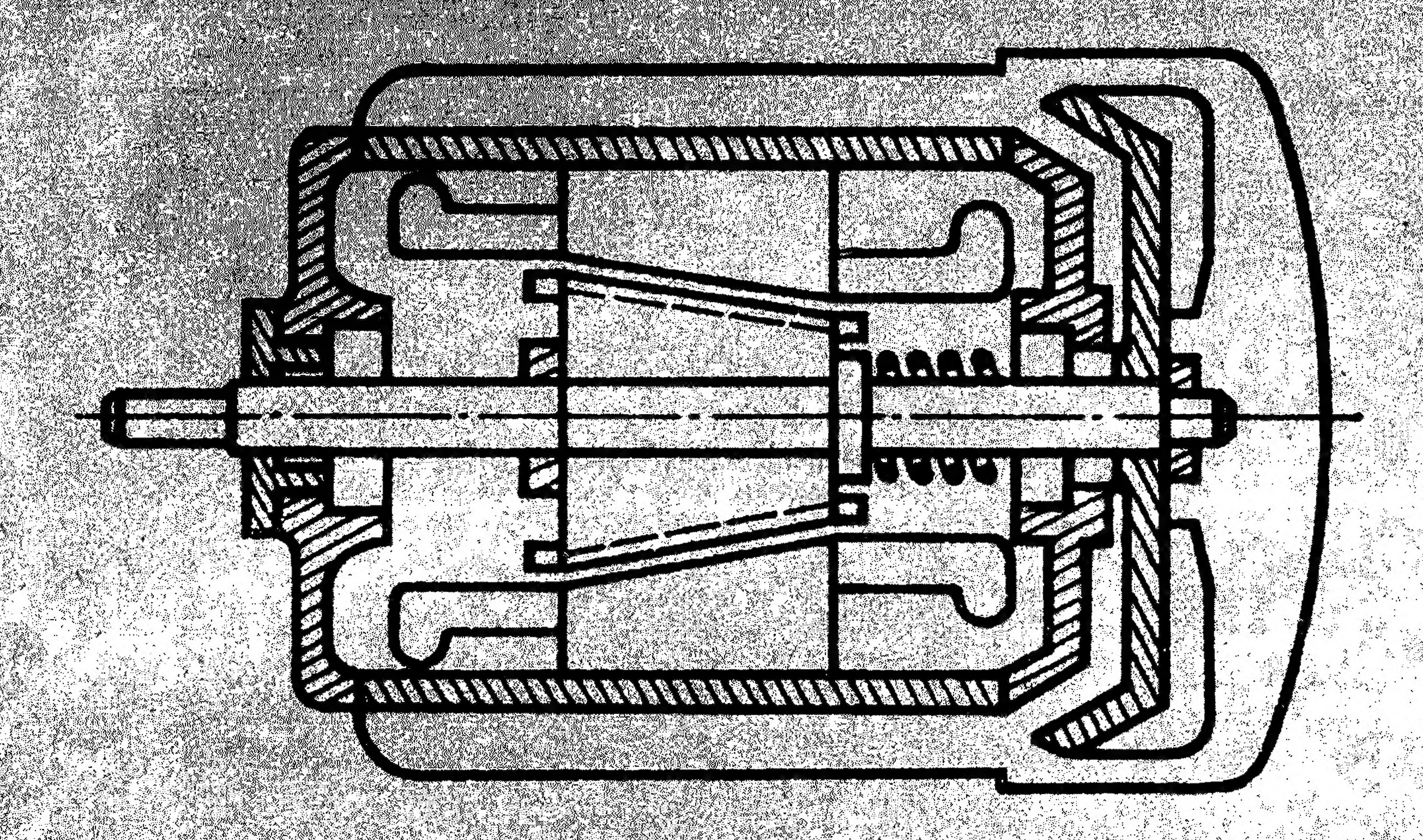
Н. П. РЯШЕНЦЕВ, С. А. ШВЕЦ

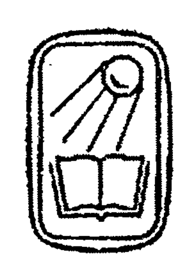


САМОТОРМОЗЯЩИЙСЯ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОНУСНЫМ РОТОРОМ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР · СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, С. А. ШВЕЦ

САМОТОРМОЗЯЩИЙСЯ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОНУСНЫМ РОТОРОМ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА» · СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
НОВОСИБИРСК · 1974

УДК 621.313.3.333

Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований по расчету и конструированию самотормозящихся асинхронных двигателей с конусным ротором. Дан обзор и анализ отечественных и зарубежных конструкций этих двигателей, указаны области возможного их применения. Рассматриваются вопросы электромагнитного расчета, а также расчета осевого усилия, пуска и торможения конусных двигателей и некоторых его параметров.

Издание рассчитано на широкий круг научных и инженерно-технических работников, а также может служить пособием для студентов электромеханических вузов.

Р $\frac{0373-1513}{042(01)-74}$ 999-73

ПРЕДИСЛОВИЕ

В осуществлении технической революции и повышении производительности труда ведущая роль принадлежит электрификации производства и на ее основе автоматизации производственных процессов. Последние требуют решения определенных технических проблем, необходимых для обеспечения нормальной эксплуатации современных машин и механизмов. Одним из таких вопросов является требование быстрого автоматического останова машин и механизмов в нужный для производства момент. Значение тормозных устройств повышается в связи с интенсификацией производства, с увеличением движущихся масс, скорости движения и частоты торможения.

Повышенные требования к точности останова при очень малом выбеге исполнительного двигателя вызвали в последние годы появление работ, в которых для торможения электродвигателей предлагаются различные тормозные конструкции и схемы как тормозов, так и самих двигателей.

Конусные самотормозящиеся электродвигатели имеют магнитную систему, общую с исполнительным тормозным электромагнитом. По существу, электромагнит встроен в двигатель.

Данная книга посвящена работе конусных двигателей. В ней приведен материал по конструктивному исполнению конусных двигателей, рассмотрены расчет и выбор основных параметров двигателя. Книга не претендует на полный охват всех вопросов, связанных с расчетом, исследованием и проектированием конусных двигателей, и является одной из первых работ, посвященных этой теме. Нужно еще много работать, чтобы создать стройную теорию конусных двигателей.

Авторы будут благодарны читателям за их критические замечания, которые помогут в дальнейшей работе. Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: Новосибирск, 99, Советская, 18, Сибирское отделение изд-ва «Наука».

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в различных отраслях народного хозяйства широко применяются электродвигатели, обеспечивающие быстрый автоматический останов в нужный для производства момент времени. Механическое торможение с электромагнитным тормозом имеет ряд достоинств по сравнению с другими способами торможения: возможность получения практически неограниченной величины тормозного момента, а значит, и получения быстрого и точного останова; отсутствие дополнительного нагрева двигателя при торможении, сравнительно небольшой вес и простота конструкции тормозного устройства, его малая стоимость.

Наряду с разработкой разных тормозных систем с электромагнитным приводом исследователи заняты созданием тормозного электромагнитного привода на базе конусного двигателя. Принципиальным отличием конусных двигателей от двигателей нормального исполнения является наличие дополнительного осевого усилия, возникающего за счет конусности ротора и статора. Это обстоятельство позволяет применять конусные двигатели в тех случаях, когда двигатели нормального исполнения требуют специального устройства, создающего осевое усилие. Таким образом, по характеру действия самотормозящиеся конусные двигатели подобны двигателям с механическим торможением (с электромагнитным приводом) и так же, как последние, могут применяться для быстрой и точной остановки всех приводов независимо от их мощности, инерционности и частоты включения.

Основное достоинство конусных двигателей по сравнению с другими способами торможения — простота устройства и отсутствие дополнительных тормозных элементов.

Кроме того, конусные двигатели благодаря отсутствию электромагнита избавлены от ряда недостатков, при-

Таблица 1

Тип двигателя	Полезная мощность. квт	К. п. д., %	Коэффициент мощности	Отношение пускового момента к номинальному	Отношение тормозного момента к номинальному	Вес электродвигателя, кг	Наружный диаметр статора, мм	Длина пакета статора, мм	Угол конусности ротора, град
Дкр 32-2	4	80,2	0,91	1,52	2	46		115	17°10′
Дкр 31-2	3	78,7	0,91	1,48	2	38	180	88	17°40′
Дкр 32-4	3	81,1	0,75	1,8	1,8	46		115	10°20′
Дкр 31-4	2,2	79,5	0,71	1,97	2	38		88	12°
Дкр 32-6	2,2	73,7	0,65	1,82	1,6	46		115	8°10′
Дкр 31-6	1,5	72,6	0,64	1,73	2	38		88	10°
Дкр 42-2	7,5	80,3	0,89	1,93	1,8	79		150	12°50′
Дкр 41-2	5,5	83,7	0,88	1,76	2	67	208	110	16°20′
Дкр 42-4	5,5	83,7	0,82	1,56	2	79		150	12°30′
Дкр 41-4	4	81,4	0,84	1,28	2,5	67		110	17°
Дкр 42-6	4	81	0,74	2,16	2	79		150	10°50′
Дкр 41-6	3	79	0,73	2,24	2,6	67		110	13°
Дкр 42-8	3	77,1	0,63	1,64	1,6	79		150	7°50′
Дкр 41-8	2,2	75,2	0,63	1,74	1,8	67		110	8°50′
АО2 11-2	0,8	76	0,885	1,8	2,14			52	
АО2 12-2	1,1	78,3	0,892	1,8	1,9		140	65	5°
АО2 11-4	0,6	71,2	0,832	1,8	2,3			52	
АО2 12-4	0,8	75	0,848	1,96	1,9			65	
АО2 11-6	0,4	67,9	0,7	1,9	2,3			65	
АО2 12-6	0,6	69,9	0,745	1,7	1,88			75	
АО2-21-2к	1,44	79,8	0,847	1,93	2,2			60	
АО2-22-2к	2,25	83	0,9	2,2	1,4			90	5°25′
АО2-21-4к	1,19	78	0,82	2,12	2		160	70	
АО2-22-4к	1,56	80	0,829	2,32	1,9			90	
АО2-21-6к	0,81	72,8	0,714	2,18	1,8			70	
АО2-22-6к	1,115	75,5	0,742	1,96	1,7			90	
АО2-31-2к	2,9	81,3	0,9	1,7	2			88	9°
АО2-32-2к	3,9	84,2	0,9	1,8	1,8			115	7°30′
АО2-31-4к	2,1	81	0,83	1,8	2			88	6°
АО2-32-4к	2,98	82,7	0,87	1,8	1,85		185	115	7°30′
АО2-31-6к	1,4	78	0,79	1,8	1,8			88	7°
АО2-32-6к	2,05	78,7	0,795	1,8	1,87			115	7°

Таблица 2

Разработал	Тип двигателя	Полезная мощность, кВт	К. п. д., %	Коэффициент мощности	Вес электродвигателя, кг	Маховой момент ротора, кг/м²	Тормозной момент, кгм
ГДР, пр. VEM	YAB833	1,6	71	0,6	60	0,088	2,5
	YAB835	2,5	71	0,62	68	0,111	3,5
ФРГ, фирма «Demag»	13/4L2	0,27			12,5	0,0038	0,23
	13/6L2	0,36			13,5	0,0045	0,23
	13/6K2	0,5			17	0,0135	0,5
	16/6K2	1,2			30	0,0293	1,2
	16/8K2	1,2			30	0,0293	1,2
	19/8K2	1,9			47	0,0572	2,1
	19/11K2	2,7			52	0,0670	2,2
	24/10K2	4,2			90	0,230	3,6
	24/14K2	5,4			105	0,264	5,0
	13/4L4	0,2			12,5	0,038	0,39
	13/6L4	0,28			13,5	0,0045	0,39
	13/6K4	0,4			17	0,0135	0,65
	16/6K4	0,61			26	0,0265	1,2
	16/8K4	1,0			30	0,0293	1,6
	19/8K4	1,6			47	0,0572	2,7
	19/11K4	2,5			52	0,0670	3,5
	24/10K4	3,5			90	0,230	5,0
	24/14K4	5,0			105	0,264	6,9
	28/12K4	7,0			145	0,490	10,8
	28/17K4	10			165	0,550	14,2
	36/14K4	14			250	1,390	20
	36/20K4	18			300	1,65	25,5
	13/4L6	0,11			12,5	0,005	0,26
	13/6L6	0,15			13,5	0,006	0,33
	13/6K6	0,25			17	0,0135	0,65
	16/6K6	0,47			26	0,0265	1,0
	16/8K6	0,63			30	0,0293	1,6
	19/8K6	1,1			47	0,0572	2,3
	19/11K6	1,7			52	0,0670	2,7
	24/10K6	2,5			90	0,280	5,0
	24/14K6	3,5			105	0,344	6,9
	28/12K6	5,2			145	0,635	10,8
	28/17K6	7,5			165	0,78	14,2
	36/14K6	11			250	1,87	20
	36/20K6	14			300	2,24	25,5
	13/6K8	0,1			17	0,0135	0,3
	16/6K8	0,25			26	0,0265	0,8
	16/8K8	0,35			30	0,0293	1,05
	19/8K8	0,5			47	0,0669	1,5
	19/11K8	0,9			90	0,280	2,3
	24/10K8	1,7			90	0,280	5,0
	24/14K8	2,5			105	0,344	6,9
	28/12K8	3,5			145	0,635	10,8
	28/17K8	5,0			165	0,78	14,2
	36/14K8	7,5			250	1,87	20
	36/20K8	10			300	2,24	25,5

сущих электродвигателям со встречеными электромагнитами и подробно изложенных в работе М. П. Александрова [1].

Конусные двигатели получили значительное распространение в отечественной (табл. 1) и зарубежной практике (табл. 2). Производством самотормозящихся конусных двигателей занимаются фирмы ФРГ [27], Франции [28], Швейцарии [29], Италии [30], Испании [31], Японии [23], Болгарии [21, 22] и т. д.

Главным недостатком самотормозящихся конусных двигателей по сравнению с двигателем нормального исполнения является более сложная технология изготовления пакета статора и ротора. Однако появляются все новые и новые прогрессивные конструкции асинхронных двигателей, позволяющих в корне изменить технологию их изготовления, улучшая при этом энергетические характеристики двигателей. Не исключено, что некоторые из двигателей, например двигатели с беспазовым статором [6], вполне можно перевести на конусное исполнение, что избавит их от технологических недостатков.

Ввиду особенностей как конструкции, так и применения конусных двигателей, расчет их существенно отличается от расчета двигателей нормального исполнения. В первую очередь это относится к электромагнитному расчету, к расчету пускового тока, процесса торможения и т. д. Все перечисленные вопросы имеют большое значение для практической разработки тормозного привода на базе конусных двигателей.

Глава I

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ КОНУСНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

Главное конструктивное отличие конусного двигателя от двигателя нормального исполнения (с цилиндрическим ротором) состоит в том, что ротор и расточка статора выполнены в виде конуса. На конусный ротор, так же как и в двигателях с цилиндрическим ротором, действуют электромагнитные силы притяжения поверхностей двух тел (ротора и статора), изготовленных из магнитного материала. Силу P, совпадающую с направлением магнитных силовых линий и направленную перпендикулярно к поверхности ротора, можно разложить на две составляющие: радиальную $F_р$ и осевую F (рис. 1).

Считаем, что ротор и статор обладают полной магнитной симметрией, тогда радиальные силы взаимно уничтожаются и на ротор будет действовать только осевая составляющая электромагнитной силы. Таким образом, у конусного двигателя ротор способен совершать вращательное (как ротор любого электродвигателя) и поступательное (подобно якорю электромагнита) движения.

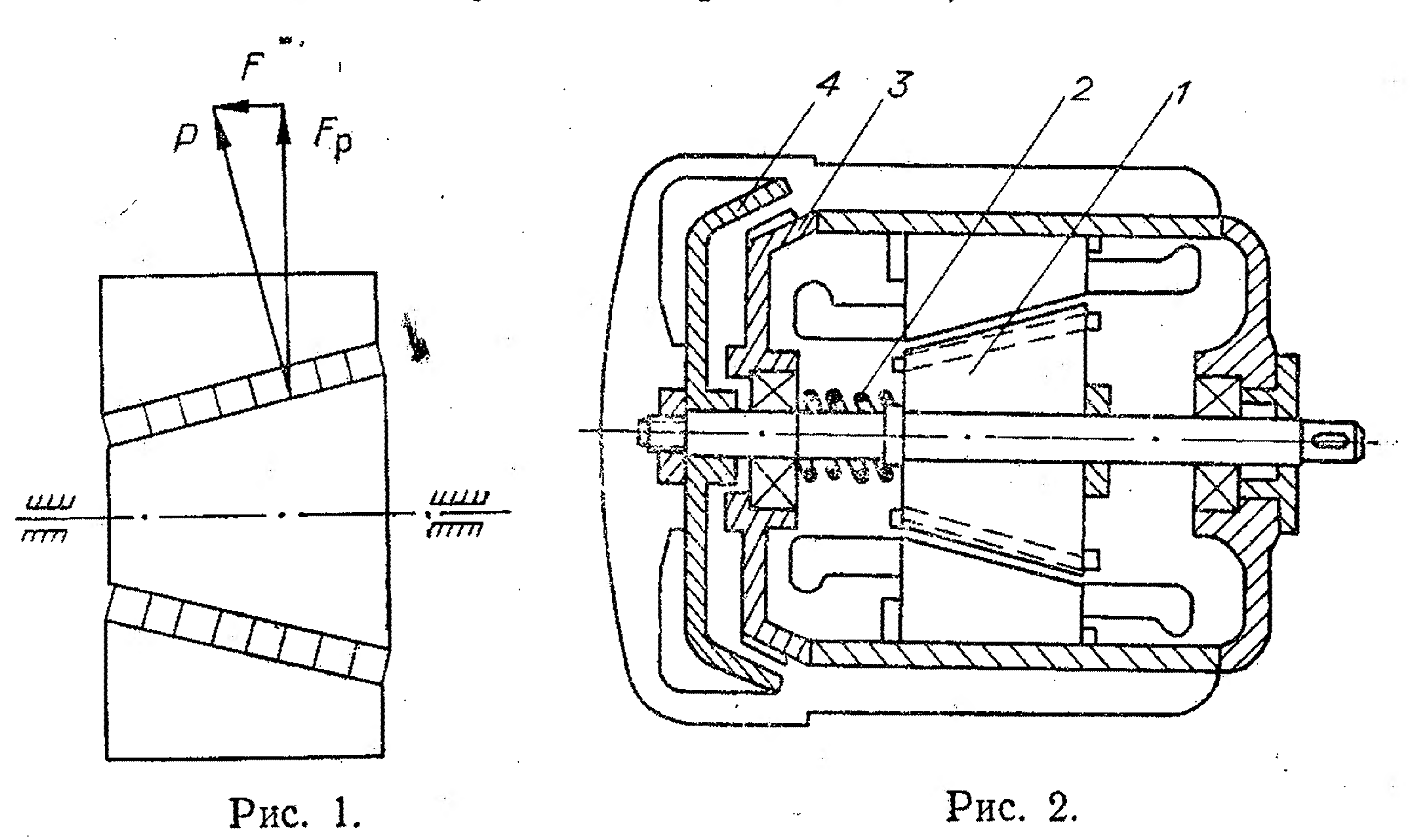


Рис. 1. Рис. 2.

Эта собенность конусных двигателей позволяет использовать их в тех случаях, когда двигатели нормального исполнения требуют специального устройства, перемещающего ротор в осевом направлении.

В настояще время конусные двигатели получили наибольшее распространение как самотормозящиеся.

Они применяются тогда, когда требуется быстрый и точный останов рабочего органа: специальные и агрегатные станки, автоматические линии, подъемнотранспортные и строительные механизмы и т. д. Кроме того, конусные двигатели благодаря своим конструктивным особенностям находят применение в промышелнности и для других целей.

Принципиальное устройство самотормозящегося конусного двигателя изображено на рис. 2. В рабочем состоянии ротор *1* втянут в расточку статора и при помощи магнитного осевого усилия удерживает тормозную пружину *2* в сжатом положении. При отключении напряжения под действием упругих сил пружины тормозной диск *4*, жестко связанный с ротором *1*, прижимается к тормозной колозке *3*. Происходит быстрый останов двигателя.

В нерабочем состоянии электродвигатель можно растормозить электрическим путем, подключив одну фазу двигателя к сети, или механическим путем — при помощи дополнительной системы тяг, отводящих диск *4* от тормозной колодки *3*.

Первые самотормозящиеся конусные двигатели, изготовленные в 1926 г. фирмой «Demag», имели такую тормозную конструкцию, когда при осевом перемещении ротор через систему рычагов действовал на колодочный тормоз. В 1931 г. тормоз был встроен в двигатель, и его тормозной диск вместе с валом ротора осуществлял вращательное и осевое перемещение, т. е. торможение стало производиться по принципу, описанному выше (см. рис. 2). В основном эта принципиальная схема торможения конусного двигателя с некоторыми различиями в конструктивном исполнении применяется и в настоящее время, хотя она имеет ряд недостатков:

а) появляется дополнительная осевая нагрузка на подшипники;

б) конструкция двигателя более громоздка;

в) при торможении возможен механический удар;

г) из-за перемещения вала затруднена связь с рабочим механизмом;

д) натяг тормозной пружины надо регулировать, что усложняет конструкцию.

Эти недостатки устранялись различными способами, чем и объясняется разнообразие конструкций таких двигателей.

Можно выделить характерные особенности конструкций конусных двигателей. Конструкция ротора имеет три принципиальных решения.

1. Ротор неподвижен относительно вала и перемещается в осевом направлении вместе с ним. Недостатки жесткой конструкции в том, что осевое смещение конца вала требует специального исполнения подшипниковых узлов и, кроме того, затрудняет сцепление вала двигателя с рабочим механизмом.

2. Ротор посажен на гильзу, которая может свободно двигаться вдоль вала. При торможении смещается только ротор, вал остается неподвижным. Эта конструкция менее жестка, но зато в этом случае сцепление с рабочим механизмом не отличается от обычных, несколько уменьшаются аксиальные нагрузки на подшипники; кроме того, уменьшение смещающихся масс ведет к более быстрому торможению.

К этой группе следует отнести конструкцию самотормозящегося конусного двигателя, выполненного с двумя статорами и роторами, установленными на общем валу и перемещающимися в противоположных направлениях (рис. 3). Двигатель в этом случае состоит из корпуса *1*, двух статоров *2*, *3*, двух роторов *8*, *11*, насаженных на втулки *9*, *12*, свободно перемещающиеся вдоль вала *7* вместе с прикрепленными к ним тормозными дисками *6*, *13*. При торможении пружина *10* прижимает тормозные диски к неподвижным дискам *5*, *14*,

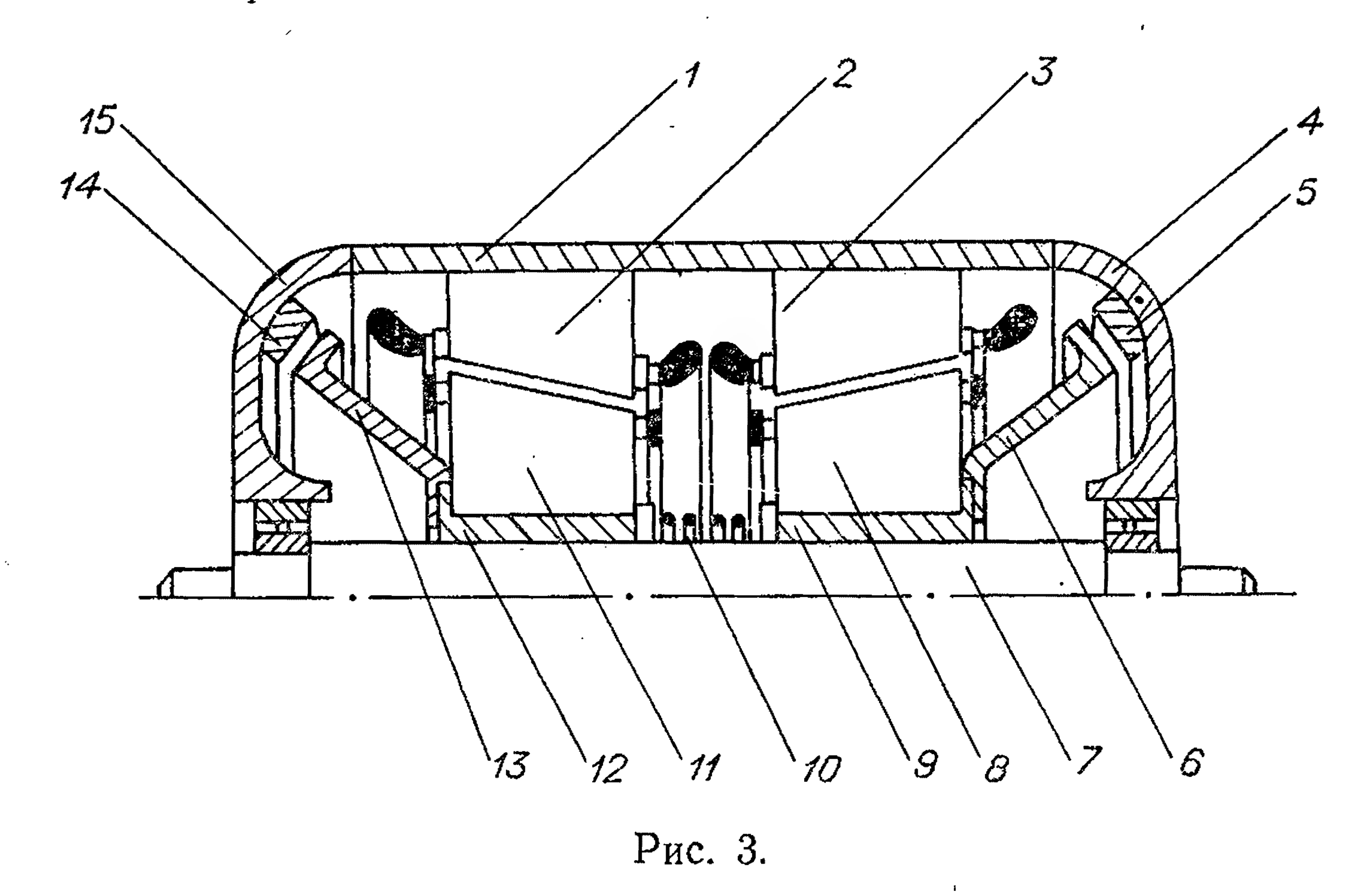


Рис. 3.

закрепленным на неподвижных щитах *4*, *15*. Так как аксиальное давление, создаваемое пружиной *10*, направлено в обе стороны, то дополнительные осевые нагрузки будут замкнуты внутри корпуса. Экономические показатели данного двигателя хуже, чем у двигателя той же самой мощности с одним ротором и статором. Поэтому вряд ли эта конструкция получит распространение [24].

3. Вал ротора конусного двигателя состоит из двух частей (рис. 4) [32]. Та часть вала, на которой закреплен ротор, может вращаться и перемещаться в осевом направлении, другая же, выходящая из двигателя для сцепления с рабочим механизмом, закрепляется так, что не может перемещаться в осевом направлении. Между собой обе части вала соединены зубчатой муфтой. Благодаря такой конструкции осевые реакции, создающиеся приводным механизмом или двигателем, поглощаются подшипниками и не передаются ротору. Кроме того, уменьшается масса, которая смещается под действием пружины при торможении, что уменьшает время сраба-

тывания. Однако эта конструкция не снимает осевой нагрузки на подшипник и значительно сложнее, чем в первом и во втором случаях, поэтому ее нельзя считать рациональной.

Для смягчения удара и плавности торможения в настоящее время применяются амортизаторы трех типов: пружинные, пластиковые, гидравлические. Более эффективны гидравлические, но применение их значительно усложняет и удорожает конструкцию. Поэтому гидравлические амортизаторы следует применять в мощных

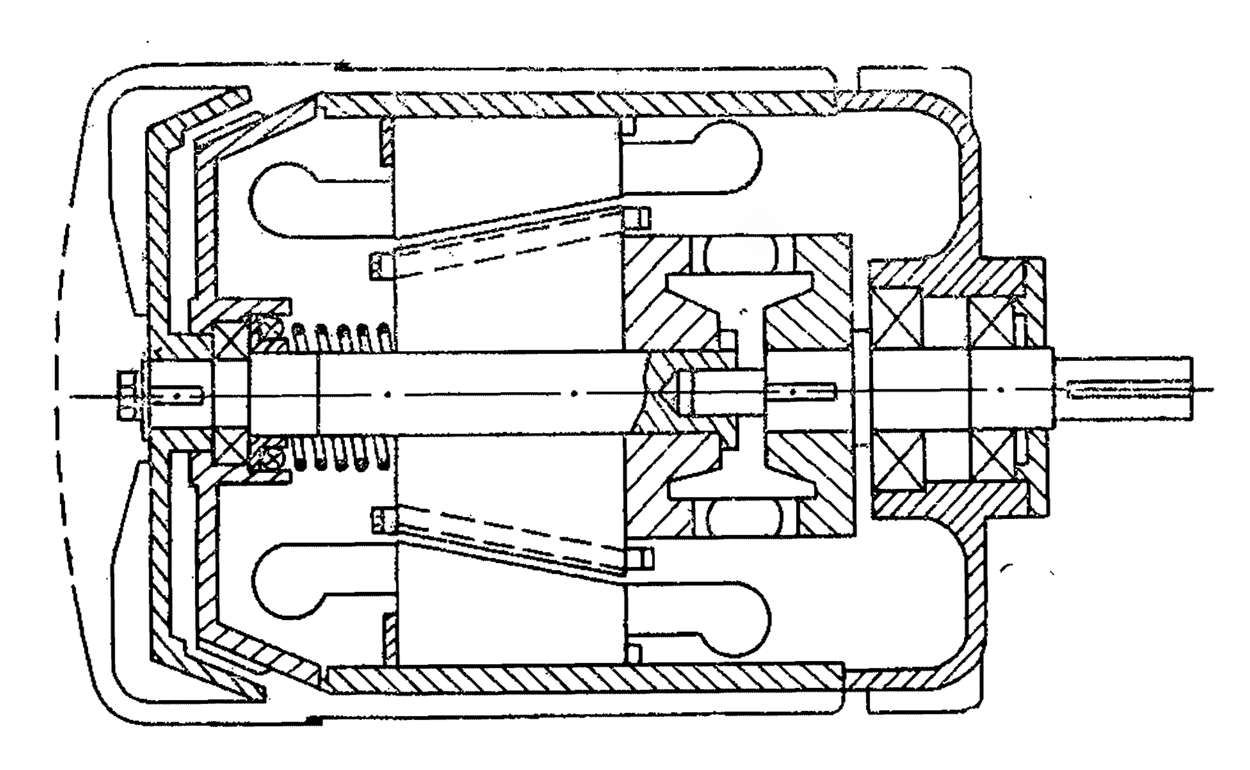


Рис. 4.

двигателях, у которых при торможении наблюдается механический удар большой энергии.

Для самотормозящихся двигателей предложен также особый подшипниковый узел, способный выдерживать осевые удары при перемещении ротора [33]. Суть его в том, что на валу рядом с радиальным подшипником устанавливается радиально-упорный шариковый подшипник, воспринимающий удары при торможении. Внутреннее кольцо второго подшипника находится на фланце, вращающемся вместе с тормозным диском.

В настоящее время самотормозящиеся конусные двигатели выполняются с регулированием натяжения тормозной пружины. Это делается при помощи кольца, установленного на валу ротора. Характерна в этом отношении конструкция конусного электродвигателя, предложенного в ФРГ [34]. При торможении сдвиг ротора осуществляется воздействием нескольких пружин, установленных вокруг вала. Эти пружины опираются одним концом на поворотное кольцо, другим — на нажимную шайбу, установленную на валу ротора. Разворачивая

поворотное кольцо по резьбе на валу ротора, можно установить различную степень натяжения всех пружин. Таким образом, сила торможения и тем самым тормозной момент могут быть установлены в полном соответствии с требованиями потребителя.

С целью упрощения конструкции конусного двигателя тормозные кольца выполняются как единое целое с подшипниковым щитом и вентилятором [35]. Это позволяет значительно уменьшить количество деталей в узле вентилятор — тормоз — подшипниковый щит. Кроме того, выполнение сплошного диска вентилятора препятствует непосредственному проникновению в двигатель тепла, выделяемого в тормозе.

Фирмой «Demag» выпускаются двигатели мощностью $P=0{,}4—30$ кВт, конструктивно составляющие одно целое с редуктором с $n=5\div280$ об/мин на выходном валу. При этом могут быть получены конструкции, позволяющие иметь несколько стабильных скоростей выходного вала. Кроме того, этой же фирмой выпускаются электротали, у которых электродвигатель установлен внутри барабана. В результате получается компактная конструкция [1]. Это является основным достоинством самотормозящихся конусных двигателей: благодаря компактности и простоте тормозного устройства их можно объединить с передаточным или преобразовательным звеном и даже с рабочим органом.

Электродвигатели с конусным ротором выпускаются предприятием VEM (ГДР) (рис. 5) и фирмой «Broun-Boweri» (Швейцария) (рис. 6) [11].

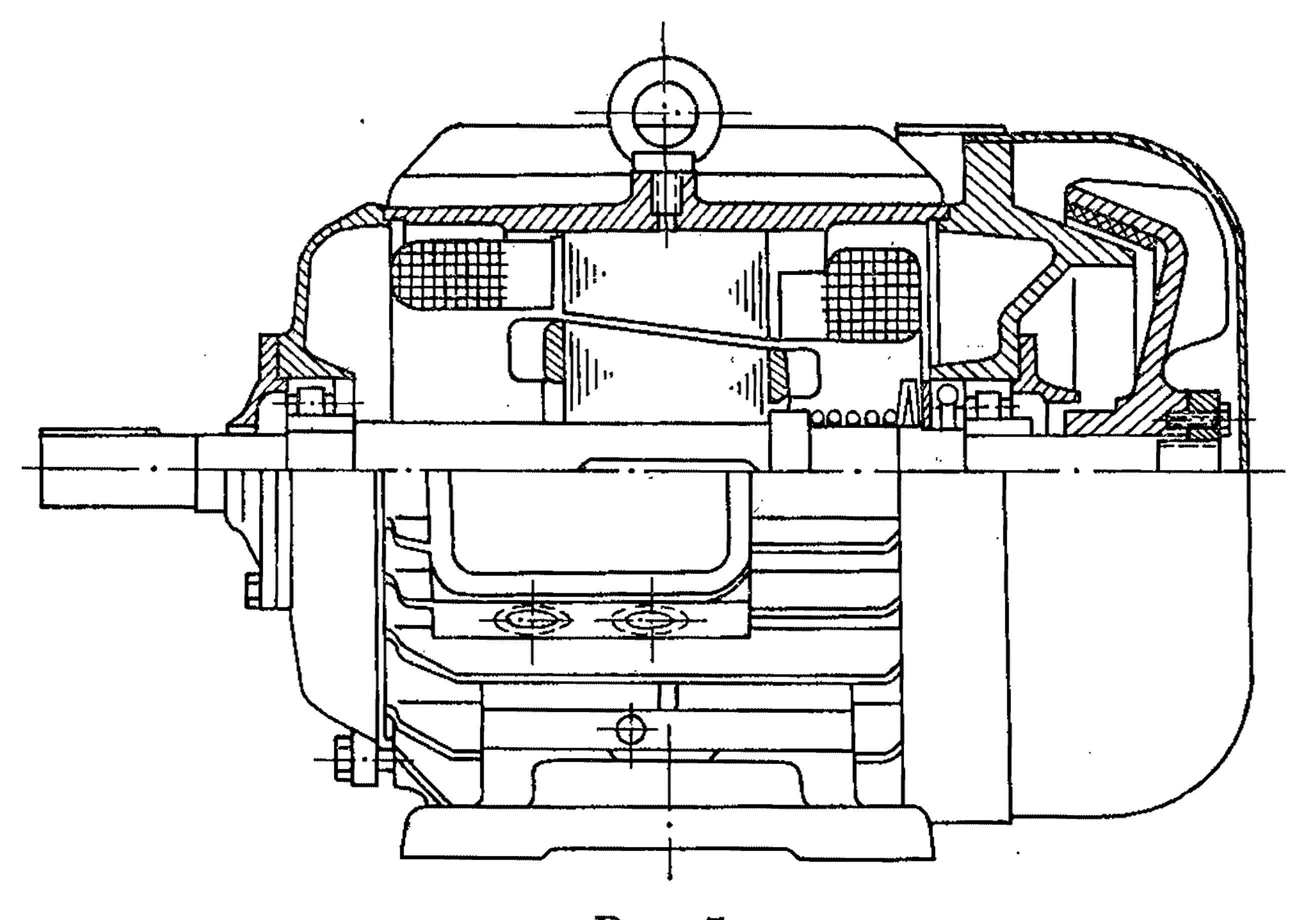


Рис. 5.

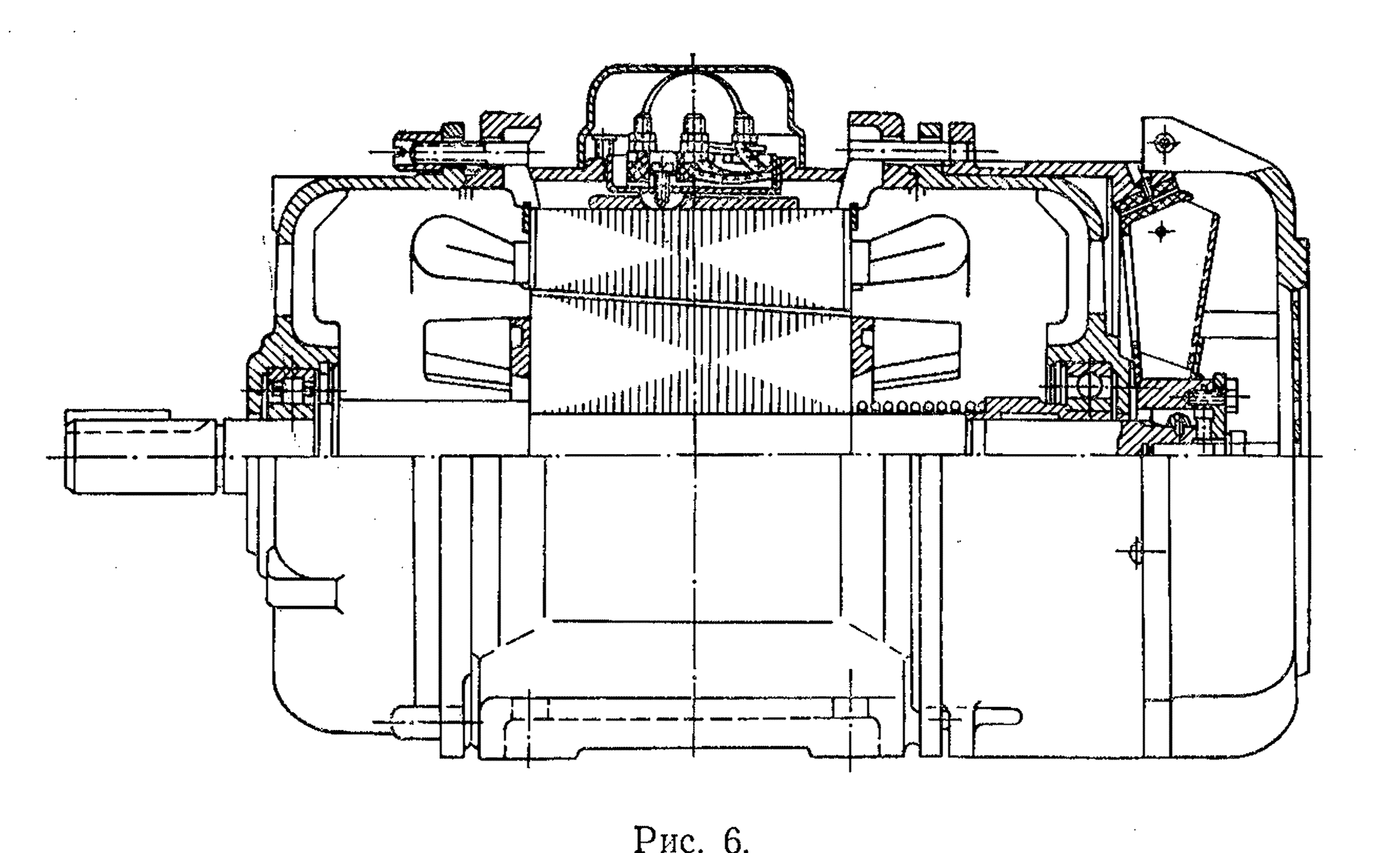


Рис. 6.

В Советском Союзе разработаны электродвигатели с конусным ротором и статором на базе единой серии АО2-4 (рис. 7) [3] и двигателей АО2-32-4 [18] (см. табл. 1), где учтены последние достижения по созданию и производству данного типа двигателей: сердечник статора и ротора набирается из листов электротехнической стали; сердечник статора после крепления его продольными скобами, обмотки и пропитки запрессовывается в станину; сердечник ротора заливается алюминием и

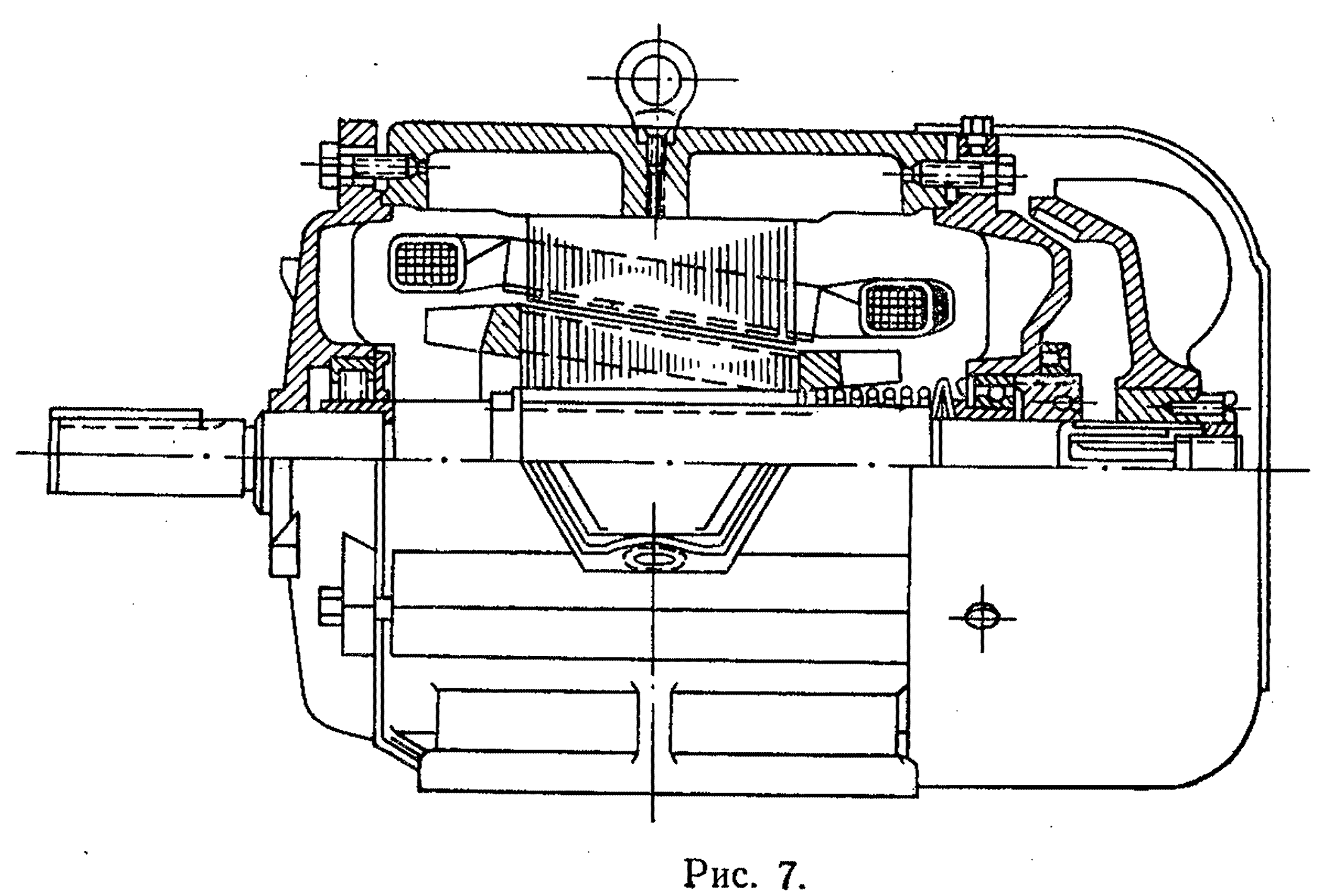


Рис. 7.

напрессовывается на вал (от перемещения по валу с одной стороны его предохраняет буртик, с другой — кольцо); задний подшипниковый щит одновременно выполняет роль тормозной колодки, поэтому внешняя его поверхность соответственно обрабатывается; тормозное кольцо выполнено совместно с вентилятором; со стороны привода установлен роликовый подшипник, позволяющий свободно перемещаться валу в осевом направлении; в заднем щите установлен шариковый радиально-упорный подшипник, воспринимающий осевые нагрузки, и этот же подшипник насажен на втулку, позволяющую валу перемещаться в осевом направлении. Двигатель имеет буферное устройство в виде тарельчатых пружин, смягчающее удар при торможении, и специальное устройство для регулирования аксиального положения тормозного кольца-вентилятора, установленного на валу.

По расположению пазов статора и ротора конструкции конусных двигателей делятся на два типа. В первой конструкции пазы расположены горизонтально, а шлицы статора и ротора — неравномерно по длине двигателя. Во второй модификации пазы расположены параллельно образующей конуса. Соответственно и технология изготовления листов ротора и статора бывает двух типов [12].

1. Листы штампуются на обычных прессах. Пазы статора и ротора расположены параллельно оси двигателя (рис. 8). Конусность достигается при помощи соответствующей механической обработки. Этот способ изготовления листов не требует специального оборудования.

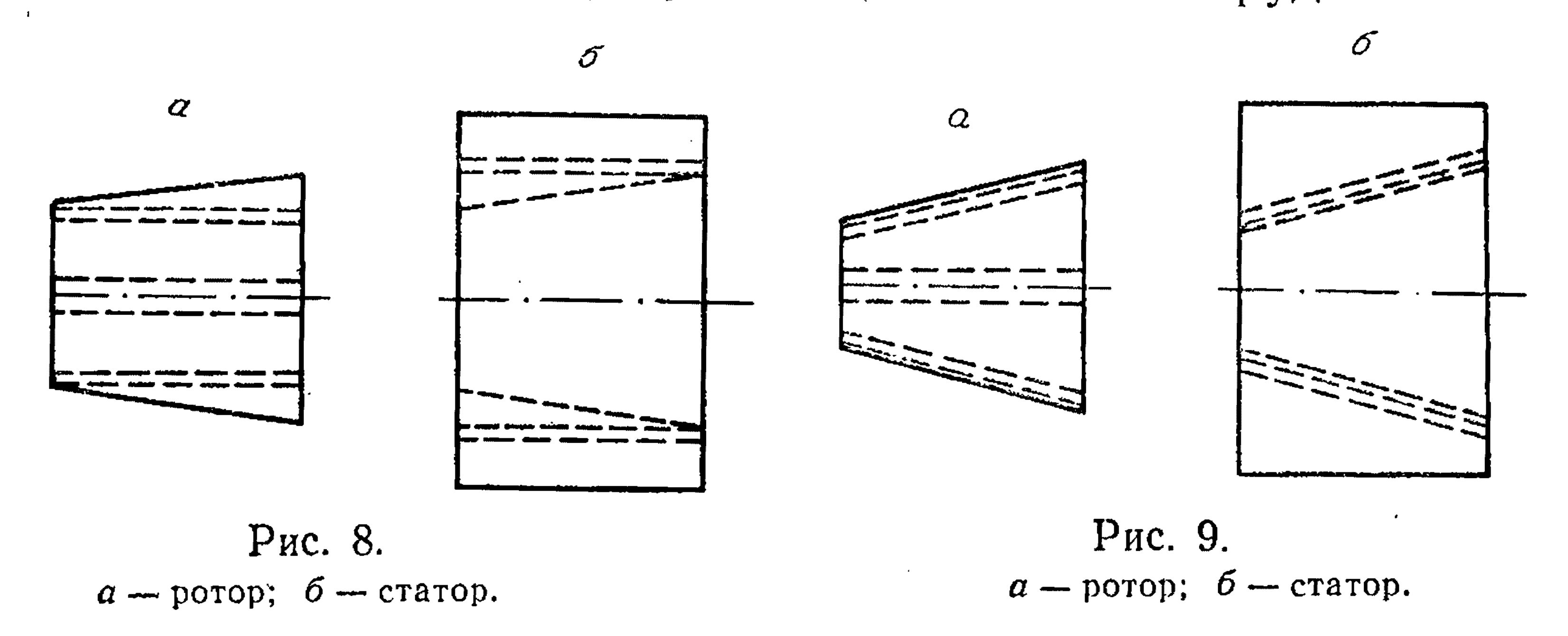


Рис. 8.
а — ротор; *б* — статор.

Рис. 9.
а — ротор; *б* — статор.

Недостаток такой технологии состоит в том, что нельзя за один удар штамповать одновременно листы статора и ротора. Это увеличивает количество операций при изготовлении магнитопровода конусного двигателя.

2. Листы штампуются на специальных прессах с делительным приспособлением, обеспечивающим по-

степенное изменение размеров листа, что позволяет выдержать заданную конусность. При чем соответствующие листы ротора и статора выбиваются из одного листа, а пазы в них расположены параллельно образующим конусов (рис. 9). После сборки статора и ротора их конусные поверхности обрабатываются на шлифовальных станках. Неостаток данной технологии — невозможность применения обычных компаундных штампов.

Несмотря на технологические преимущества двигателей конструкции первого варианта, они не получили распространения, так как опыт показал, что по энергетическим показателям они значительно уступают конусным двигателям с пазами, расположенными параллельно образующей конуса [5, 12].

В последние десятилетия появился целый ряд изобретений, направленных на совершенствование конструкции асинхронных двигателей с целью повышения их технико-экономических показателей и технологичности. Одно из перспективных изобретений в этой области — беспазовый статор электрической машины [6], предложенный Новосибирским электротехническим институтом (НЭТИ).

В 1969—1970 гг. в НЭТИ спроектирован и изготовлен первый образец асинхронного беспазового двигателя ДАОБ-1 с активно распределенным слоем статора. Испытания двигателя подтвердили эффективность новой конструкции и возможность реализации предпочтительных технико-экономических характеристик по сравнению с машинами классической конструкции.

Сущность конструкции беспазового статора [6, 77] состоит в замене зубцового слоя классической конструкции эквивалентным по своим электрическим и магнитным свойствам, но технологически автономным активно распределенным слоем (АРС) с аксиальным ферромагнитным наполнением. На рис. 10 показана конструкция беспазового цилиндрического статора двигателя, АРС которого образован активными пакетами *1* катушек, изготовленных независимо от шихтованного ярма статора. Крепление катушек АРС на ярме статора может осуществляться приклеиванием, различными нажимными кольцами, компаундированием всего АРС с последующим его монтажом на ярме. Каждая катушка содержит в себе две активные части *1*, из которых и образуется распределенный слой, и лобовые части *2*. Активные части (рис. 11) представляют собой пакеты из перемежающихся слоев проводников обмотки *3* и

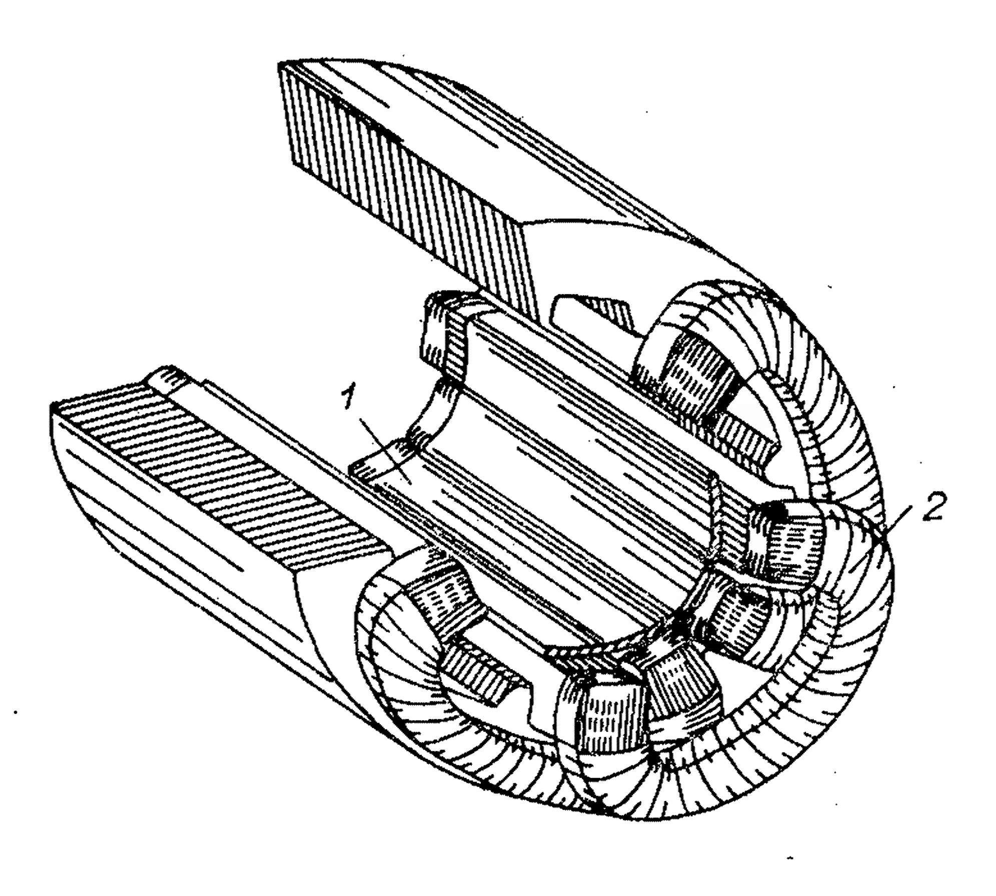


Рис. 10.

аксиальных ферромагнитных элементов — пластин 4. Проводники обмотки 3 изолированы от пластин 4 диэлектрическими прослойками 5. Обмоточные слои 3 в катушках могут выполняться фольгой и обычным обмоточным проводом. Активная часть катушки для придания ей монолитности компаундируется или склеивается, при этом пространство между стальными пластинами 4 заполняется компаундом, что предотвращает возможность замыканий стальных пластин при последующей механической обработке внутренней поверхности статора. Лобовые части 2 катушки АРС не содержат ферромагнитных включений.

Беспазовая конструкция статора открывает новые технологические и конструктивные возможности [7].

1. Применение рядовой укладки проводников АРС увеличивает заполнение паза и, следовательно, повышает технический уровень машины.

2. Статор АРС не имеет явно выраженной зубцовой структуры, что улучшает форму кривой магнитного поля в воздушном зазоре, и имеет меньший уровень шумов магнитного происхождения.

3. Упрощение конфигурации паза и уменьшение количества пазов снижает трудоемкость при производстве штампов и увеличивает их долговечность.

4. Возможна механическая обработка внутренней поверхности статора после сборки катушек АРС и придания ей той или иной конфигурации. При этом не происходит замыкания пластин, образующих зубцы статора.

5. Можно штамповать пластины любой формы, в том числе и конусной.

Несмотря на недостатки приведенной конструкции, к которым прежде всего следует отнести наличие технологического зазора между ферромагнитным ярмом и АРС, данная конструкция, бесспорно, найдет применение при проектировании самотормозящихся конусных двига-

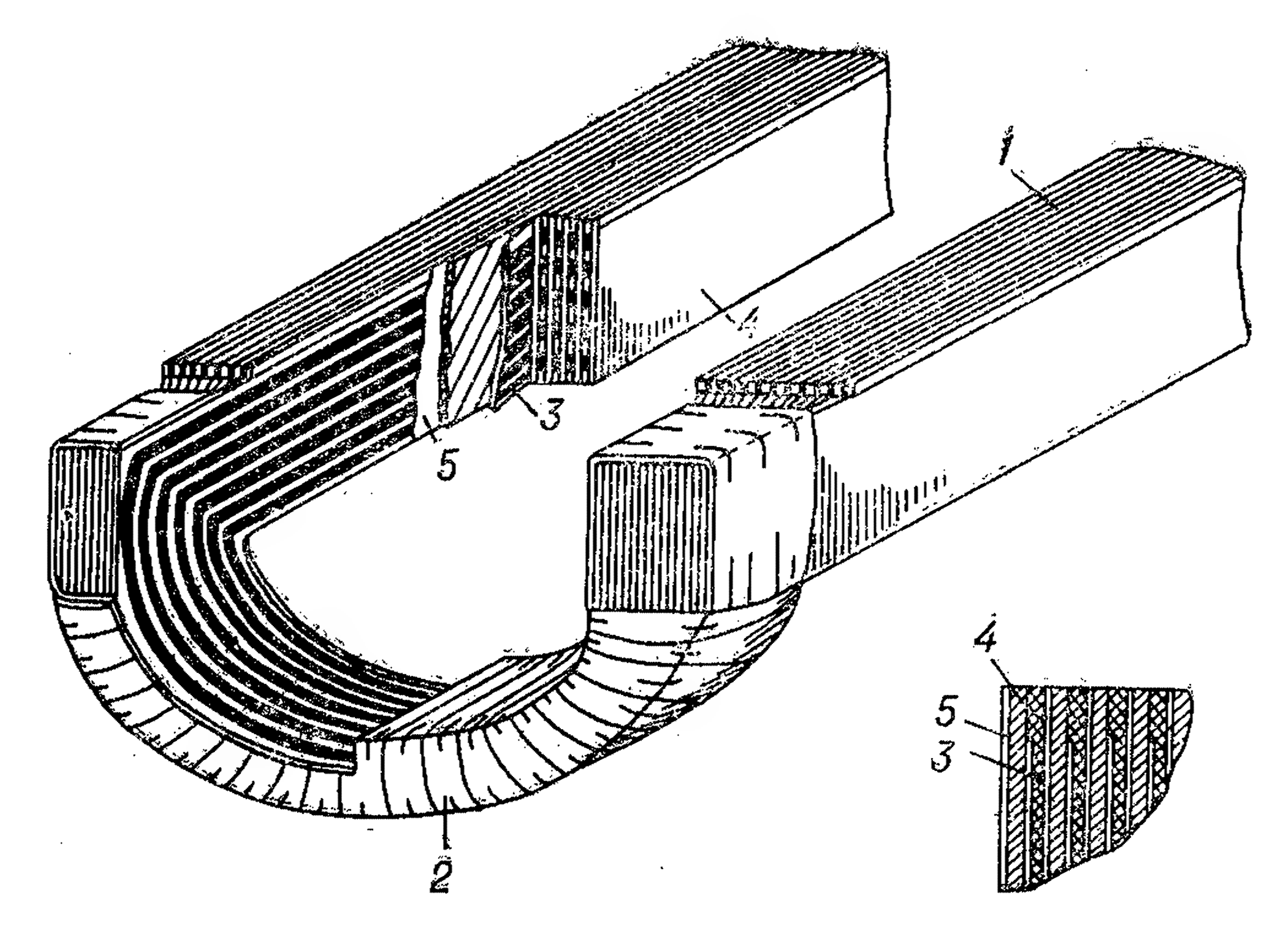


Рис. 11.

телей, так как в этом случае отпадает вопрос об их нетехнологичности.

В США [25] и Венгрии [36] разработана конструкция погружного двигателя с конусным ротором, причем форма статора цилиндрическая (*1*), а ротор *2* представляет собой соединение двух усеченных конусов вершинами внутрь так, что максимальный воздушный зазор получается посредине длины двигателя (рис. 12). Дело в том, что погружные двигатели нормального исполнения имеют большую длину и, как следствие, большой прогиб вала, поэтому во избежание соприкосновения ротора со статором они выполняются с увеличенным воздушным зазором. Применение конусного ротора позволяет уменьшить воздушный зазор и тем самым улучшить энергетические показатели двигателей.

В Венгрии запатентован конусный двигатель [37], конструкция которого позволяет перемещать ротор в осевом направлении и тем самым регулировать воздуш-

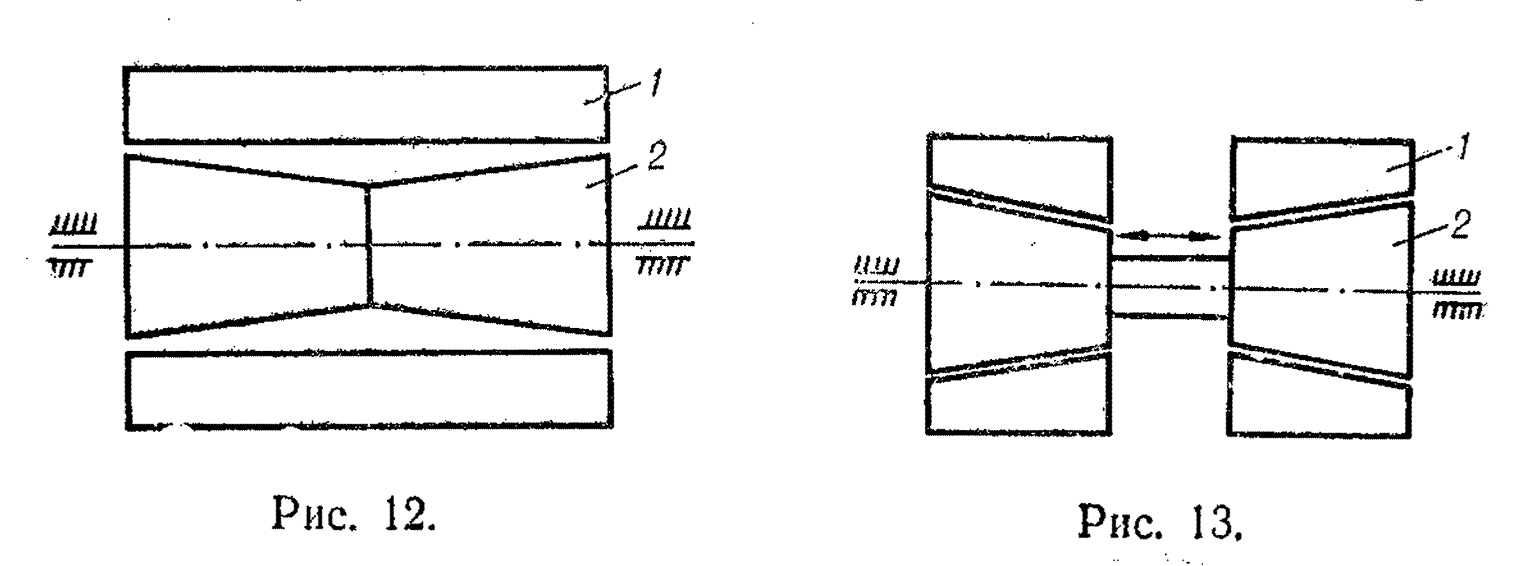


Рис. 12. Рис. 13.

ный зазор в процессе работы. Это позволяет регулировать вращающий момент двигателя в зависимости от нагрузки.

Интересна идея создания конусного двигателя с регулируемым числом оборотов [38]. Такой двигатель состоит из двух трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами, расположенными на общем валу (рис. 13). Статорные обмотки могут быть выполнены с различными схемами соединения и подключаться к сети как последовательно, так и параллельно, но должны иметь различное число полюсов. Статоры *1* и роторы *2* имеют конусную форму, к тому же роторы могут свободно аксиально перемещаться вдоль вала, так что двигатель может работать с переменными воздушными зазорами. Смещение роторов в одном из направлений увеличивает момент того двигателя, у которого уменьшается воздушный зазор, при этом момент другого двигателя соответственно уменьшается, что приводит к изменению скорости вращения вала.

В Новосибирском электротехническом институте был изготовлен опытный образец беспружинного виброударного механизма на базе конусного двигателя АО2-21-6К [4]. На рис. 14 представлена принципиальная конструк-

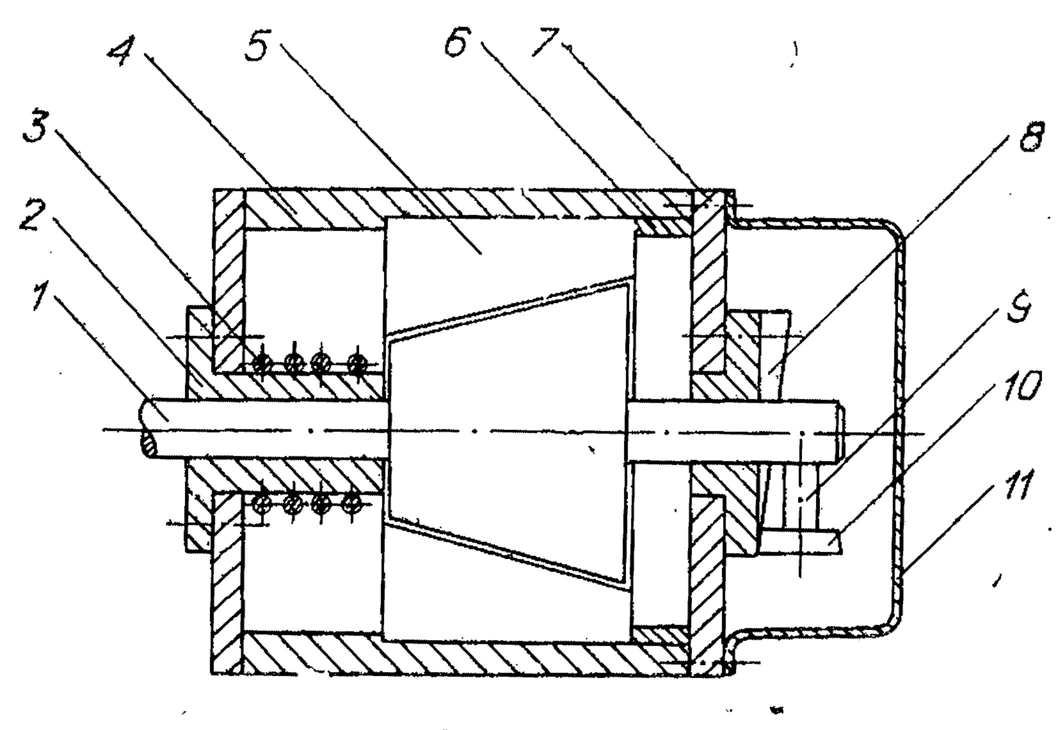


Рис. 14.

тивная схема этого механизма (*1* — ротор двигателя; *2* — втулка; *3* — буферная пружина; *4* — корпус; *5* — статор; *6* — упорное кольцо; *7* — крышка; *8* — втулка; *9* — ось ролика; *10* — ролик; *11* — кожух).

Ротор свободно перемещается в осевом направлении во втулках *2* и *8*. Втулка *8* одновременно является кулачком. При вращении ротора *1* ролик *10*, осью *9* жестко связанный с ротором, накатывается на профиль торцово-

го кулачка *8*, перемещая ротор вправо. Обратный ход ротора осуществляется за счет осевой электромагнитной силы, втягивающей его в расточку статора. В конце рабочего хода вал ротора ударяет об ограничитель осевого перемещения или в торец бойка (на рис. 14 не показаны), вращение которому придается при помощи шлицевого соединения его с валом ротора. Если кулачок выполнить с плавным спуском, то механизм будет работать в вибрационном режиме.

Естественно, что эта принципиальная схема не исчерпывает всех возможных конструктивных вариантов вибрационных и ударных механизмов на базе конусного двигателя.

Такая конструкция, обеспечивающая одновременность возвратно-поступательного и вращательного движения, выгодно отличается от других простотой (имеется всего одна движущаяся часть — ротор), отсутствием выпрямителей и переключателей, значительно упрощает кинематическую схему привода, дает возможность непосредственного сращивания двигателя с рабочим органом.

Таким образом, конусные двигатели могут быть использованы не только для создания тормозного привода, но и в других целях. Можно утверждать, что область возможного их применения не ограничится перечисленными выше примерами.

Глава II

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЦЕПИ И ОСЕВОГО УСИЛИЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

У конусного электродвигателя ротор и расточка статора выполнены в виде конуса, поэтому во время работы магнитная цепь такого двигателя имеет изменяющиеся геометрические размеры по длине. Если идти по длине двигателя от наименьшего значения диаметра ротора, то диаметры ротора и статора конусной части будут равномерно возрастать. Приращение диаметра на элементе длины Δl будет

$$\Delta D = 2\operatorname{tg}\alpha \cdot \Delta l,$$

минимальный и максимальный внутренний диаметр статора

$$D_{i_1} = D_{i_{\text{ср}}} - l \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

$$D_{i_2} = D_{i_{\text{ср}}} + l \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где $D_{i_{\text{ср}}}$ — средний внутренний диаметр статора;
l — длина сердечника статора;
α — угол односторонней конусности двигателя.

В связи с этим будет уменьшаться высота ярма статора, увеличиваться высота ярма ротора, ширина зубца статора и ротора. Магнитное сопротивление по длине двигателя будет также неравномерным, отдельные участки магнитной цепи будут иметь повышенные значения магнитной индукции.

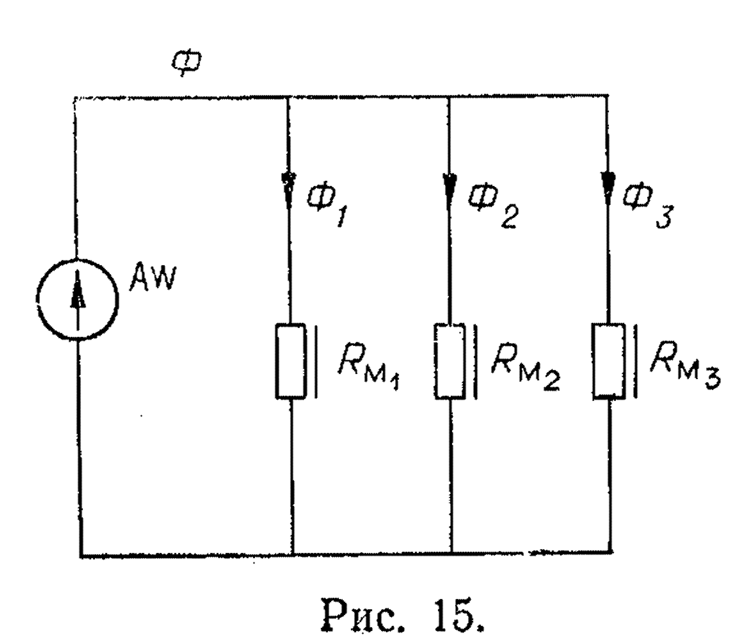


Рис. 15.

Если исходить из условия, что элементы магнитной цепи по длине двигателя включены параллельно друг относительно друга и на одну намагничивающую силу (рис. 15), то расчет магнитной цепи следует вести следующим образом. Двигатель по длине разбивают на несколько (n) участков, для простоты расчетов участки берутся равной длины (рис. 16). Прежде чем приступить к расчету магнитной цепи приближенным методом, выбирают основные габаритные размеры (средний внутренний диаметр статора $D_{i_{\text{ср}}}$, средний внешний диаметр ротора $d_{a_{\text{ср}}}$, длину сердечника статора l, внешний диаметр статора D_a и внутренний диаметр ротора d, форму пазов статора и ротора), соответствующие основным размерам двигателя с цилиндрическим ротором равной мощности и габаритов. Затем ведется расчет для каждого участка отдельно. Применяя метод итераций, добиваются равенства намагничивающей силы каждого участка [9]. Перво-

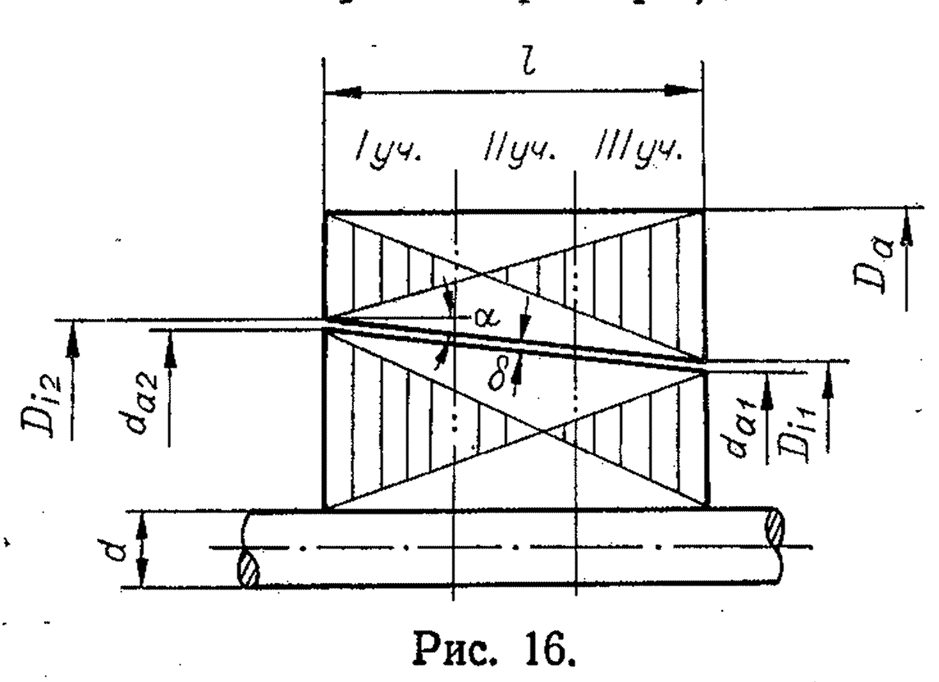


Рис. 16.

начально принимаем потоки на всех участках $\Phi_i = \Phi/n$, где Φ — полный магнитный поток двигателя, n — число элементарных участков.

Существует графический метод, при котором строятся для каждого участка характеристики $\Phi_i = f(Aw)$, затем строится суммарная характеристика по потоку $\Phi = f(Aw)$ и по этой кривой определяется намагничивающая сила Aw.

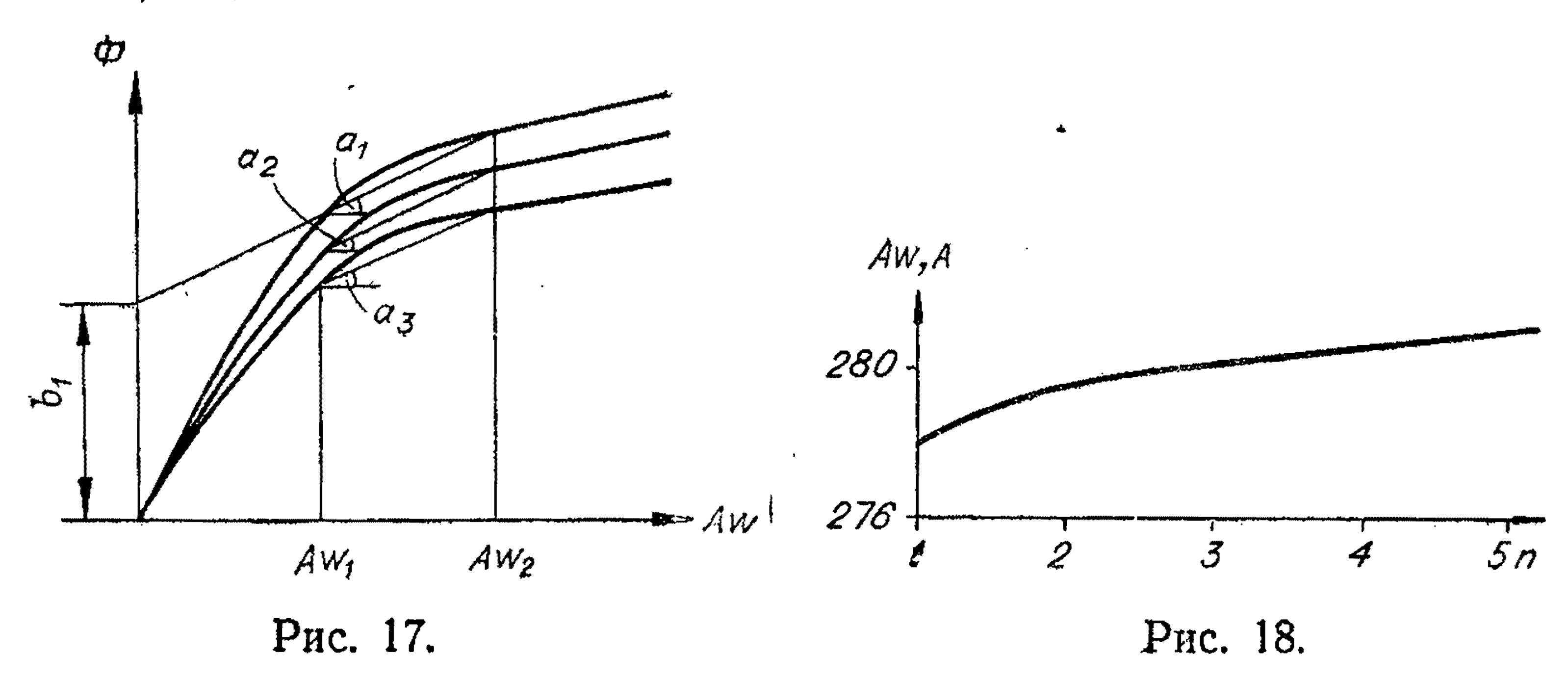


Рис. 17. Рис. 18.

Для расчета магнитной цепи может быть рекомендован и графо-аналитический метод [10].

Характеристики $\Phi_i = f(Aw)$ на рабочем участке аппроксимируются прямыми, т. е. каждая характеристика строится по двум точкам (рис. 17). В результате получаем систему уравнений

$$\Phi_i = a_i \cdot Aw + b_i; \qquad \sum_{i=1}^{i=n} \Phi_i = \Phi, \qquad (II.1)$$

коэффициенты системы определяются:

$$a_i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta Aw}, \qquad b_i = \Phi_i - a_i \cdot Aw.$$

При различных значениях n решение системы (II.1) даст искомый результат. Так, при $n=3$ получим:

$$\Phi_1 = \frac{b_1(a_2 + a_3) - a_1(b_2 + b_3) + a_1\Phi}{a_1 + a_2 + a_3};$$

$$\Phi_2 = \frac{b_2(a_1 + a_3) - a_2(b_1 + b_3) + a_2\Phi}{a_1 + a_2 + a_3};$$

$$\Phi_3 = \frac{b_3(a_1 + a_2) - a_3(b_1 + b_2) + a_3\Phi}{a_1 + a_2 + a_3};$$

$$Aw = \frac{\Phi_1 - b_1}{a_1} = \frac{\Phi_2 - b_2}{a_2} = \frac{\Phi_3 - b_3}{a_3}.$$

Чем на большее число участков будет разбита магнитная цепь, тем точнее становится расчет и вместе с тем более трудоемким. На рис. 18 приведена зависимость $Aw=f(n)$ для одного из примеров, откуда следует, что результат расчета мало изменяется при $n>3$. Значит, при числе магнитных участков, равном трем, можно получить удовлетворительные результаты расчета.

При расчете магнитной цепи двигателя и его участков нужно учитывать изменение параметров двигателя по его длине. Следует оперировать средними величинами на каждом участке. Если определенные параметры линейно изменяются в осевом направлении, то они равны параметрам двигателя середины каждого участка. К ним относятся внутренний диаметр статора D_i; полюсное деление τ; внешний диаметр ротора d_a; зубцовое деление статора t_1 и ротора t_2; расчетная ширина зубца статора b_{zp_1} и ротора b_{zp_2}; расчетная высота спинки статора h_{a_1} и ротора h_{a_2}; расчетная длина силовой линии в спинке статора L_{a_1} и ротора L_{a_2}. Для величин, нелинейно изменяющихся по длине двигателя, целесообразно найти их среднеинтегральное значение. Так, коэффициент воздушного зазора статора равен

$$k_{\delta_{1i}}=\frac{1}{\Delta t_{1i}}\int\limits_{t_{1i\,\min}}^{t_{1i\,\min}+\Delta t}\frac{t_{1i}}{t_{1i}-\dfrac{a_1^2}{5\delta-a_1 i}}dt,$$

где a_1 — ширина открытия паза статора;
$t_{1i\,\min}$ — минимальное зубцовое деление i-го участка статора;
δ — воздушный зазор;
Δt_{1i} — приращение зубцового деления i-го участка статора при увеличении длины участка на Δl; на всей длине участка $\Delta t_{1i}=\dfrac{2\pi l\cdot\operatorname{tg}\alpha}{z_1}$.

После взятия интеграла и некоторых преобразований получим выражение для определения воздушного зазора статора

$$k_{\delta_{1i}}=1+\frac{a_1^2 z_1}{(5\delta+a_1)2\pi l_i\cdot\operatorname{tg}\alpha}\ln\left[1+\frac{2\pi l_i\cdot\operatorname{tg}\alpha}{z_1\left(t_{1i\,\min}-\dfrac{a_1^2}{5\delta+a_1}\right)}\right]$$

Коэффициент воздушного зазора ротора соответственно равен

$$k_{\delta_{2i}} = 1 + \frac{a_2^2 + z_2}{(5\delta + a_2)\, 2\pi l_i \cdot \operatorname{tg}\alpha} \ln\left[1 + \frac{2\pi l_i \cdot \operatorname{tg}\alpha}{z_2\left(t_{2i\,\min} - \frac{a_2^2}{5\delta + a_2}\right)}\right],$$

где a_2 — ширина открытия паза ротора;

$t_{2i\,\min}$ — минимальное зубцовое деление i-го участка ротора;

z_1, z_2 — соответственно число зубцов статора и ротора.

Для определения средних значений коэффициента насыщения зубцов k_z и коэффициента перекрытия a_δ необходимо построить $k_z = f(l)$ (рис. 19), а по ней $a_\delta = f(l)$, используя зависимость $a_\delta = f(k_z)$ [15]. Графическое интегрирование соответственных зависимостей даст среднее значение этих коэффициентов.

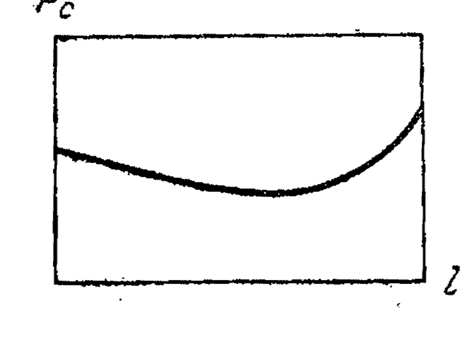


Рис. 19.

При расчете параметров обмоток статора и ротора необходимо учесть, что длина паза l_n равна $l/\cos\alpha$. Для нахождения потерь в стали надо вычислить потери в стали на каждом участке, затем построить кривую $P_c = f(l)$ (рис. 20) и графическим интегрированием определить суммарные потери в стали.

От угла односторонней конусности α зависят тормозные характеристики двигателя. Однако увеличивать α можно только до определенного предела, так как с

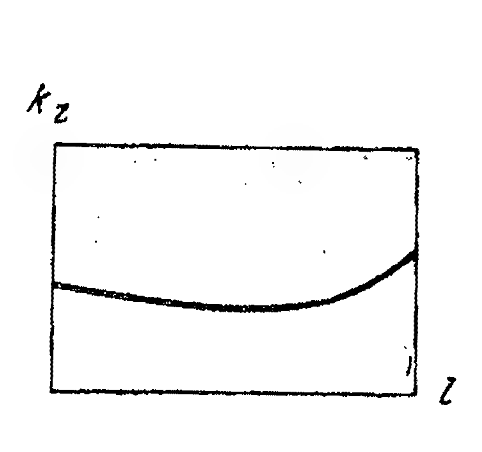


Рис. 20.

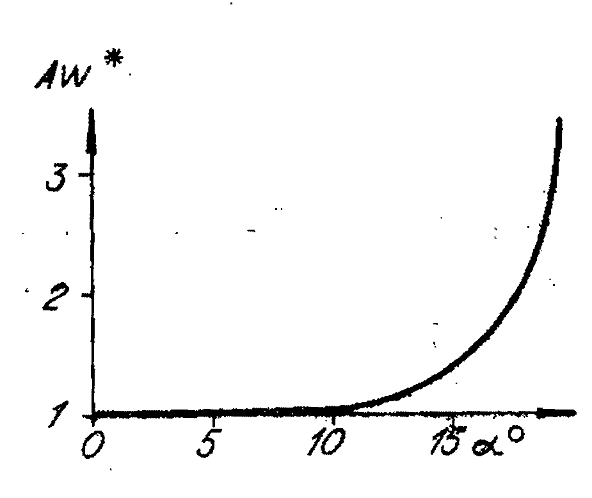


Рис. 21.

увеличением α соответственно возрастают ток намагничивания, ток статора, потери в двигателе, его нагрев. На рис. 21 приведена относительная зависимость изменения намагничивающей силы Aw^* от угла односторонней конусности α. Из этой кривой видно, что максимальное значение угла α должно быть в пределах 10÷15°.

РАСЧЕТ ОСЕВОГО УСИЛИЯ

Точный расчет осевого усилия — один из главных вопросов проектирования конусных двигателей, так как от величины осевого усилия зависят как тормозной, так и пусковой режимы работы конусных двигателей.

Осевое усилие конусных двигателей можно определить по изменению энергии электромагнитного поля при перемещении ротора в осевом направлении.

$$F = \frac{dW}{dy},$$

где W — энергия магнитного поля;

y — перемещение ротора в осевом направлении.

В общем случае механическая работа, совершаемая электромагнитным механизмом, производится за счет изменения энергии, сосредоточенной как в воздушном зазоре, так и в магнитопроводе.

Однако если в магнитной цепи имеется воздушный зазор и если магнитная система полностью не насыщена, т. е. $\mu \gg \mu_0$, то основное изменение магнитной энергии происходит в воздушном зазоре [14]. В этом случае изменением электромагнитной энергии магнитопровода можно пренебречь и с достаточной для практики точностью учитывать измененение электромагнитной энергии только воздушного зазора. Поэтому для определения осевой силы конусного двигателя исходят из изменения электромагнитной энергии воздушного зазора при перемещении ротора:

$$F = \frac{dW_в}{dy},$$

где $W_в$ — электромагнитная энергия воздушного зазора.

С учетом выражения для магнитной энергии можно записать:

$$W_в = \frac{(\beta B_\delta)^2 k_\delta \delta l \pi D_{ср}}{2\mu_0 \cos\alpha},$$

где B_δ — максимальная индукция воздушного зазора;

β — отношение среднеквадратичного значения индукции к максимальному;

δ — воздушный зазор;

μ_0 — магнитная проницаемость воздуха.

Для конусного ротора магнитная индукция воздушного зазора по длине двигателя изменяет свою величину $B_\delta = f(l)$. Кроме того, средний диаметр $D_{ср}$ ротора и ко-

эффициент, усредняющий длину пути магнитного потока в воздушном зазоре k_δ, также будут иметь различные значения по длине двигателя: $D_{ср}=f(l)$, $k_\delta=f(l)$.

Допустим, что магнитная индукция, диаметр и коэффициент воздушного зазора останутся постоянными на бесконечно малом отрезке длины воздушного зазора dl. Тогда электромагнитная энергия будет равна:

$$dW_в = \frac{(\beta_i \cdot B_{\delta_i})^2}{2\mu_0 \cdot \cos\alpha} \cdot k_{\delta_i} \delta \pi D_{ср\,i} \cdot dl_i.$$

Отсюда электромагнитная энергия воздушного зазора конусного двигателя

$$W_в = \int_0^{l_i} \frac{(\beta_i B_{\delta_i})^2}{2\mu_0 \cdot \cos\alpha} k_{\delta_i} \delta \pi D_{ср\,i} \cdot dl_i.$$

С достаточной точностью интеграл можно заменить суммой, т. е.

$$W_в = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\pi (\beta \cdot B_{\delta_i})^2 k_{\delta_i} \delta D_{срi} l_i}{2\mu_0 \cdot \cos\alpha}$$

Последнее выражение запишем применительно к отдельным участкам

$$W_в = W_{в_1} + W_{в_2} + \ldots + W_{в_n},$$

тогда электромагнитная сила (осевое усилие)

$$F = \frac{dW_в}{dy} = \frac{dW_{в_1}}{dy} + \frac{dW_{в_2}}{dy} + \ldots + \frac{dW_{в_n}}{dy},$$

$$\text{или } F = F_1 + F_2 + \ldots + F_n = \sum_{i=1}^{i=n} F_i,$$

где F_i — осевое усилие отдельного участка;

$W_{вi}$ — электромагнитная энергия отдельного участка.

При осевых перемещениях ротора величину воздушного зазора определяем по формуле

$$\delta_y = \delta + y \cdot \sin\alpha.$$

Если длина сердечника ротора больше длины сердечника статора на величину осевых перемещений, то длина ротора каждого участка l_i при выдвижении ротора из расточки статора изменяться не будет (рис. 22).

Приняв напряжение сети постоянным и пренебрегая падением напряжения в обмотке статора, что при не-

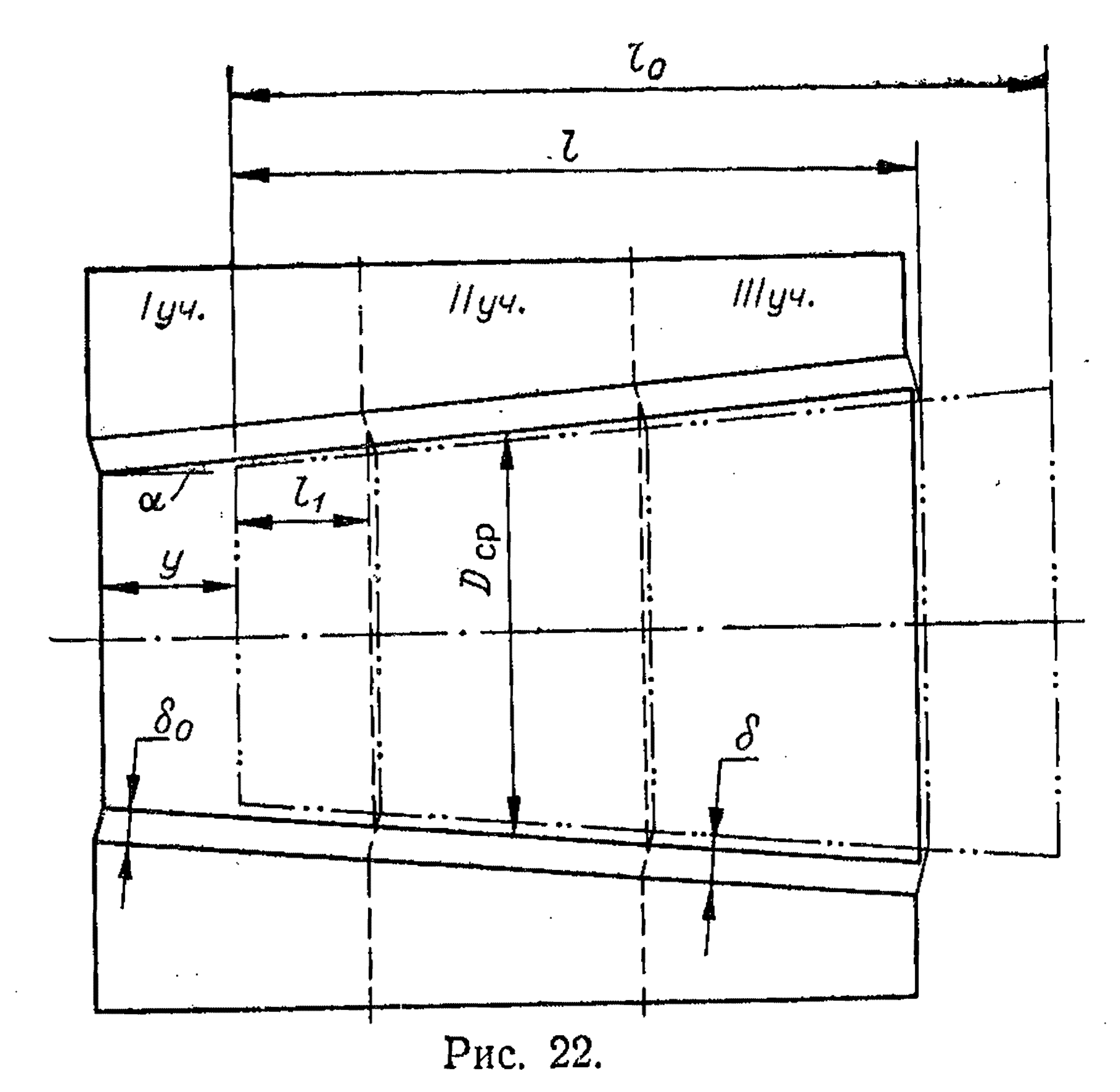


Рис. 22.

больших перемещениях ротора вполне допустимо, можно считать магнитный поток двигателя, а значит и индукцию, также постоянным и не зависящим от величины перемещения. Тогда осевое усилие рассматриваемого участка

$$F_i = \frac{\pi D_{\text{cp}\,i}\, l_i \cdot k_{\delta_i} (\beta_i B_{\delta_i})^2 \cdot \operatorname{tg}\alpha}{2\mu_0} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{(\delta_0 + y \cdot \sin\alpha)\dfrac{dk_{\delta_i}}{dy}}{\sin\alpha \cdot k_{\delta_i}} \right] \qquad \text{(II.2)}$$

Двигатели с гладким и зубчатым роторами имеют различное математическое выражение коэффициента k_δ, поэтому и значения $\frac{dk_\delta}{dy}$ этих двигателей различны.

Если длина сердечника ротора равна длине сердечника статора, то длина первого участка ротора равна

$$l_y = l_1 - y \cdot \cos^2\alpha.$$

Следует отметить, что в рабочем положении конусного двигателя, когда ротор втянут в расточку статора, при равной длине ротора и статора наиболее выгодное расположение ротора такое, при котором ротор выдвинут из статора на величину, равную $\delta_0 \sin\alpha$. При таком по-

ложении весь магнитный поток будет проходить через воздушный зазор δ (выпучивание магнитных силовых линий не учитывается). Практически величина $\delta_0 \sin\alpha$ мала, однако при расчетах осевой электромагнитной силы F будем считать, что в рабочем режиме ротор выдвинут из расточки статора на это расстояние.

Осевое усилие первого участка определится

$$F_1 = \frac{\pi D_1 k_{\delta_1} (l_1 - y\cos^2\alpha)\,\mathrm{tg}\,\alpha\,(\beta B_{\delta_1})^2}{2\mu_0} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{\delta_0 + y\sin\alpha}{k_{\delta_1}\sin\alpha} - \frac{\delta_0 + y\sin\alpha}{l_1 - y\cos^2\alpha}\right]. \qquad \text{(II.3)}$$

Отметим, что при $\alpha > 2°$ и осевых перемещениях $y < 5$ мм

слагаемые $\dfrac{(\delta_0 + y\sin\alpha)\,\dfrac{dk_\delta}{dy}}{k_\delta \sin\alpha}$ и $\dfrac{\delta_0 + y\sin\alpha}{l_0 - y\cos^2\alpha} \ll 1.$

Поэтому при расчетах, которые не требуют большой точности, ими можно пренебречь, и формулы (II.2) и (II.3) примут вид

$$F_i = \frac{\pi D_i\, l_i\, k_{\delta_i}(y)(\beta_i B_{\delta_i})^2 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha}{2\mu_0};$$

$$F_1 = \frac{\pi D_1 k_\delta (y)(l_0 - y\cos^2\alpha)(\beta_1 B_{\delta_1})^2 \cdot \mathrm{tg}\,\alpha}{2\mu_0}.$$

В приведенных формулах расчета осевого усилия степень насыщения стали не учитывалась и считали $\mu = \infty$. Для более точных расчетов необходимо учитывать и насыщение стали. В работе [26] предлагается конечную проницаемость стали определять путем ввода отношения $\dfrac{\mu_e - 1}{\mu_e}$, где μ_e — магнитная проницаемость стали.

Степень насыщения зубцов, которая характеризуется коэффициентом k_z, влияет на коэффициент формы потока $k_ф$ и полюсного перекрытия α_δ (рис. 23). Поэтому при расчете индукции воздушного зазора необходимо учитывать ее зависимость от k_z. Аналогичным образом учитывается изменение отношения среднеквадратичного значения индукции к максимальному значению β от k_z (рис. 24).

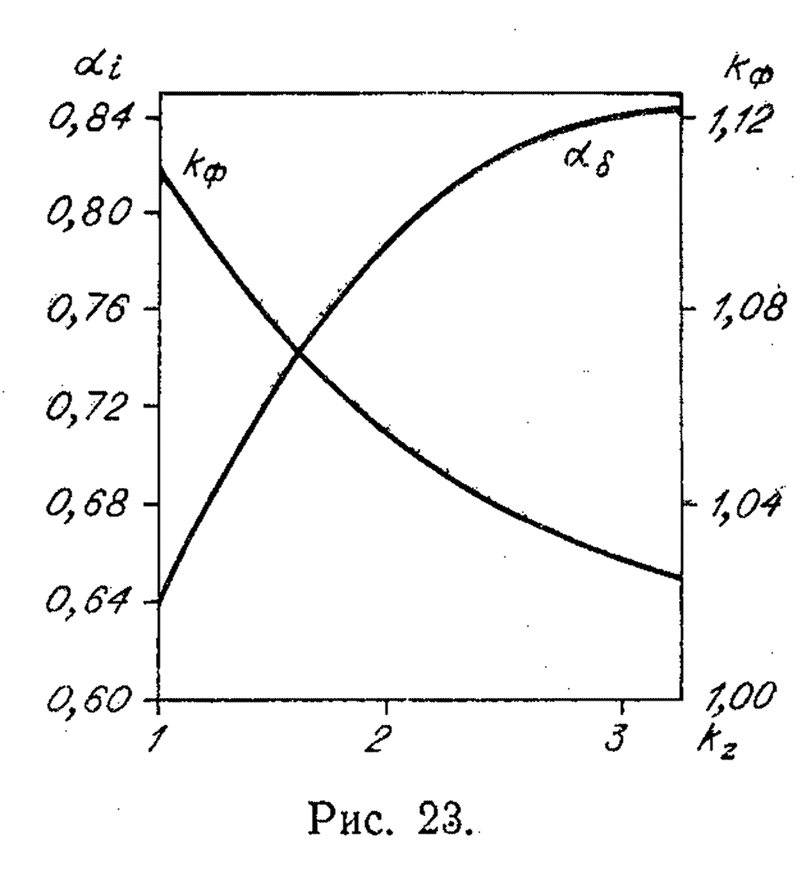


Рис. 23.

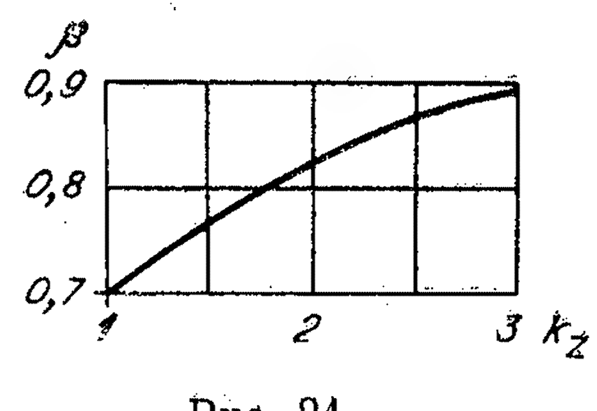


Рис. 24.

Если магнитопровод не насыщен, то магнитная индукция в зазоре распределяется равномерно по длине двигателя и при этом $\beta = 0{,}707$. Тогда всю длину двигателя можно принять за один участок, и формулы определения осевого усилия (II.2) и (II.3) примут вид

$$F_i = \frac{\pi D_{cp} l k_{\delta_{cp}} (\beta B_\delta)^2 \operatorname{tg} \alpha}{2\mu_0} \left[1 + \frac{(\delta_0 + y \sin \alpha) \dfrac{dk_{\delta_{cp}}}{dy}}{\sin \alpha \cdot k_{\delta_{cp}}} \right];$$

$$F_1 = \frac{\pi D_{cp} k_{\delta cp} (\beta B_\delta)^2 (l - y \cos^2 \alpha) \operatorname{tg} \alpha}{2\mu_0} \times$$

$$\times \left[1 + \frac{(\delta_0 + y \sin \alpha) \dfrac{dk_\delta}{dy}}{k_{\delta_1} \sin \alpha} - \frac{\delta_0 + y \sin \alpha}{l_1 - y \cos^2 \alpha} \right]$$

При расчете осевого усилия необходимо учитывать влияние скольжения s, так как индукция в зазоре пропорциональна магнитному потоку Φ и соответственно э. д. с. двигателя E, последнее определяется [13]:

$$E_1 = U_1 \sqrt{\frac{(r_2'/s)^2 + (x_2')^2}{(r_1 + c_1 \cdot r_2'/s) + (x_1 + c_1 x_2')^2}},$$

где r_2 — активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора;

x_2 — индуктивное сопротивление рассеяния ротора, приведенное к обмотке статора;

r_1 — активное сопротивление статора;

x_1 — индуктивное сопротивление рассеяния статора;

s — скольжение;

U_1 — напряжение на обмотке статора;

c_1 — коэффициент, равный $1 + z_1/z_0$.

Таким образом,

$$F_s = F_{н} \cdot \frac{\dfrac{(r_2'/s)^2 + (x_2')^2}{(r_1 + c_1 \cdot r_2'/s)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}{\dfrac{(r_2'/s_{н})^2 + (x_2')^2}{(r_1 + c_1 r_2'/s_{н})^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}},$$

где $s_{н}$ — номинальное скольжение;

$F_{н}$ — осевое усилие при $s_{н}$.

Из последней формулы следует, что F_s имеет минимальное значение при $s=1$, т. е. при пуске двигателя.

До сих пор расчет осевого усилия велся без учета влияния потоков рассеяния зубцов. Однако при пуске двигателя его необходимо учитывать, так как при $s=1$ потоки рассеяния становятся соизмеримыми с основным потоком. Дополнительное осевое усиление от потоков рассеяния равно [21]:

$$F_n = \frac{18,1}{q} D_{cp} l \operatorname{tg} \alpha \left(\frac{wI_k}{4\delta}\right)^2 \left[\frac{t_2 - (a_1 + a_2)}{t_2} + \frac{t_1 - (a_1 + a_2)}{t_2}\right] \cdot 10^{-8},$$

где w — число эффективных витков статора;

q — число пазов на полюс и фазу;

I_k — пусковой ток статора.

На ротор также действует осевое усилие, вызванное полями лобовых частей. Это усилие равно [26]:

$$F_л = \left(\frac{B_\delta \cdot \beta}{5000}\right)^2 \cdot \pi l D_{cp} \left(\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\delta}{l} \operatorname{arctg} \varepsilon - \frac{\delta}{D_{cp}} \cdot \operatorname{tg} \alpha\right),$$

где $\varepsilon = \frac{y}{\delta}$.

Фактически $F_л \ll F$, и ее можно не учитывать.

Кроме лобовых частей на ротор будут действовать магнитные поля торцовых частей ротора и статора [19]:

$$F_т = \frac{800 k_\delta^2 (\beta \cdot B_\delta)^2 (\delta + y \sin \alpha)^2 \cdot D_{cp}}{\mu_0 \pi^2 \left(y + \frac{\delta}{\pi}\right)}.$$

Это усилие также незначительно и им можно пренебречь.

Помимо этих составляющих на ротор действует осевое усилие высших гармоник магнитного поля, которое достигает нескольких процентов от усилия основной гармоники [22].

В конусных двигателях так же, как и в двигателях нормального исполнения, наблюдаются осевые силы, вызванные вентиляционными каналами, скосом пазов, взаимным положением ротора и статора. Учет их производится по той же методике, что и для двигателей с цилиндрическим ротором [20].

Выше было показано, что осевое усилие F пропорционально E_1^2. Если пренебречь падением напряжения в статорной обмотке, то $F \equiv U_1^2$. Согласно требованиям ГОСТа, напряжение источника питания может колебаться в пределах от +5 до −10%, поэтому необходимо при проектировании двигателя вводить коэффициент надежности, равный $(1/0{,}90)^2 = 1{,}23$.

По требованиям ГОСТа, частота питающей сети колеблется в пределах ±3%, а это значит, что при прочих равных условиях будет меняться индукция и осевое усилие $F_f = F_{50}\left(\frac{50}{f}\right)^2$. Таким образом, при проектировании конусных двигателей в случае необходимости можно учитывать влияние и этого фактора.

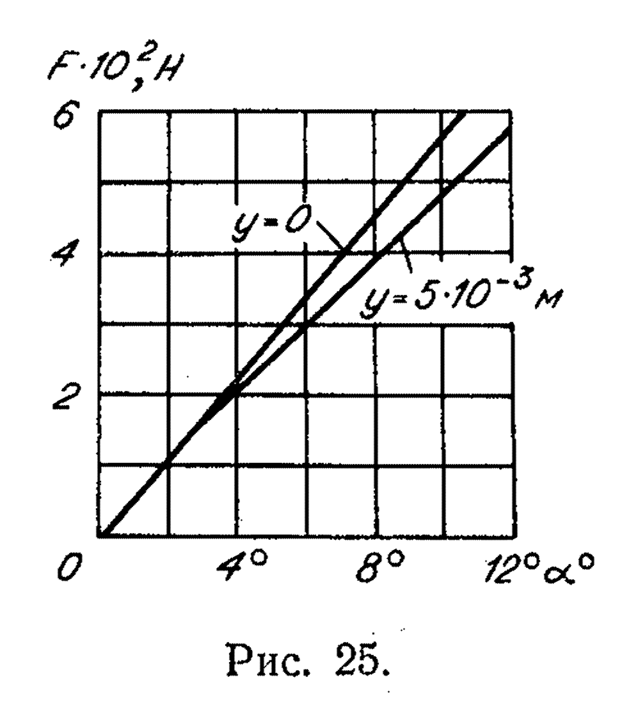


Рис. 25.

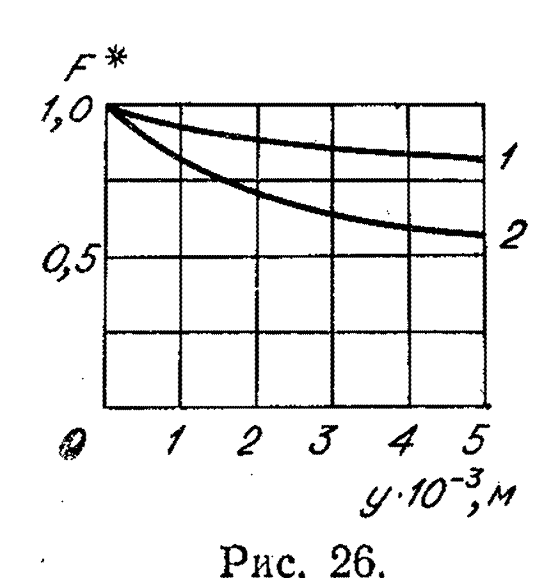


Рис. 26.

На рис. 25 показана зависимость F от угла α, из которой видно, что практически F прямо пропорциональна углу α, при малых углах α конусные двигатели развивают небольшое осевое усилие.

На рис. 26 построены зависимости относительного значения F^* от осевых перемещений y, при $s = s_н$ (кривая 1) и $s = 1$ (кривая 2). Видно, что при $s = s_н$ тяговая характеристика двигателя жесткая. В пусковом режиме с изменением осевого перемещения усилие F также изменяется значительно.

Глава III

ПУСКОВОЙ РЕЖИМ

ПРОЦЕСС ПУСКА

В заторможенном состоянии ротор конусного двигателя прижат тормозной пружиной к тормозу и выдвинут из расточки статора на максимальную величину. Воздушный зазор имеет максимальное значение, равное $\delta_y = \delta + y_m \cdot \sin\alpha$. После подачи напряжения на ротор действуют электромагнитные силы, стремящиеся его развернуть (вращать) и втянуть в расточку статора. Другими словами, пуск двигателя и растормаживание — перемещение в осевом направлении — происходят одновременно. При этом в отличие от двигателей нормального исполнения пуск происходит при увеличенном воздушном зазоре, а значит, и при повышенных потерях в двигателе. Поэтому осевое усилие нужно выбрать таким образом, чтобы время втягивания ротора в расточку статора $t_{вт}$ было минимальным и намного меньше времени разгона ротора $t_{раз}$ до минимальной скорости. Время втягивания ротора в расточку статора определяется от момента включения обмотки двигателя под напряжение до полного втягивания ротора (на рис. 27 осевое перемещение ротора обозначено y), а время разгона — от момента включения двигателя до установившегося значения числа оборотов (n).

Рассмотрим процесс пуска двигателя, который можно разбить на несколько этапов (рис. 27). После подачи напряжения ротор начнет вращаться только в тот момент, когда $M_п = M_т + M_с$, ($M_п$ — пусковой момент двигателя; $M_с$ — момент сопротивления всего агрегата, $M_т$ — тормозной момент). Тормозной момент $M_т$, создаваемый тормозной пружиной, снимается осевым усилием F. Однако, как было показано выше, $F \equiv I_\mu$, а так как I_μ возрастает от нуля по экспоненциальному закону, то в течение некоторого времени, пока F не увеличится до определенной величины, при которой $M_п = M_т + M_с$, ротор стоит на месте. В дальнейшем ротор совершает только вращательное движение, не перемещаясь в осевом направлении, так как его осевое усилие пока еще меньше удерживающих сил.

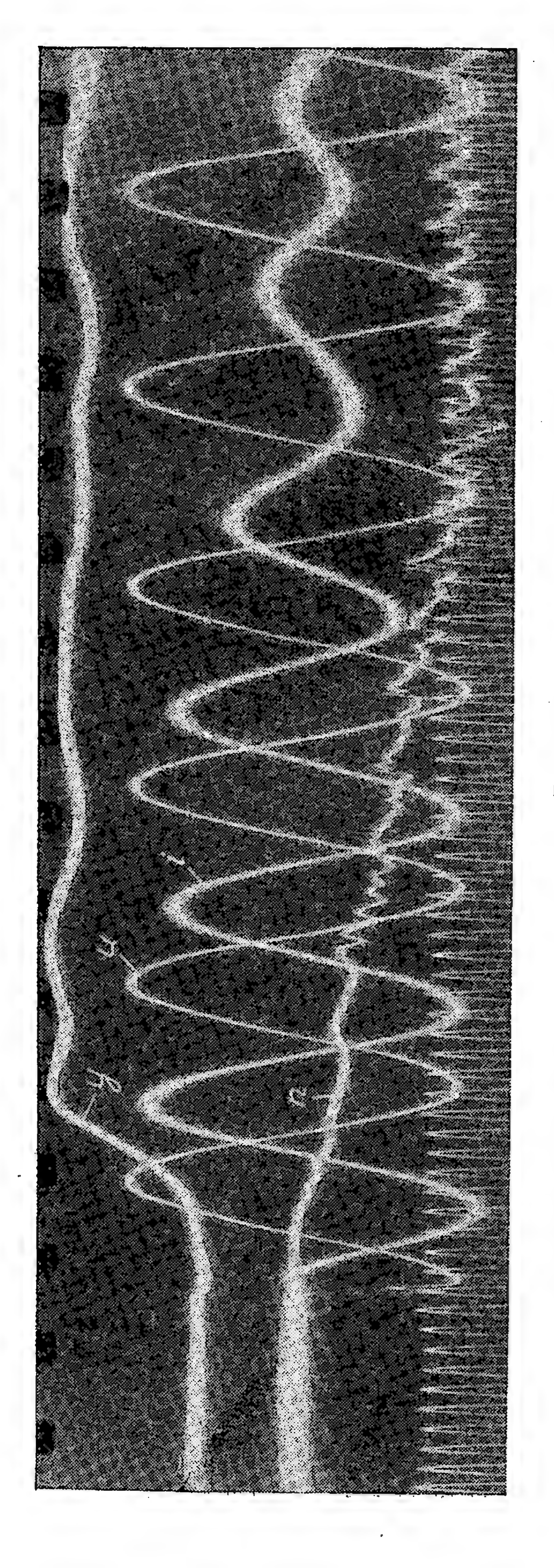


Рис. 27.

Ротор одновременно начнет совершать вращательное и поступательное движения, как только усилие будет равно силам сопротивления, т. е. $F = F_{тр} + F_{пр}$, где $F_{тр}$ — сила трения, которая состоит из двух составляющих: силы трения о воздух и силы трения скольжения в опорах. Так как скорость перемещения ротора в осевом направлении невелика, то первой составляющей можно пренебречь.

Наконец ротор занял свое рабочее место по оси, но его скорость вращения еще меньше номинальной. В этом положении процессы, происходящие в конусном двигателе, не отличаются от пусковых процессов двигателей нормального исполнения. Таким образом, процесс пуска конусных двигателей происходит сложнее, чем у двигателей нормального исполнения, так как ротор совершает одновременно вращательное и поступательное движения, причем надо учесть изменение параметров двигателя от этих обоих перемещений. Если

выразить движение ротора в расточку статора уравнением

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F - F_{тр} - F_{пр},$$

где x — перемещение ротора в осевом направлении, обратное y;

$F_{пр}$ — упругая сила пружины $F = c(x_0 + x)$;

c — жесткость пружины;

x_0 — предварительное поджатие пружины;

то переходные процессы при пуске конусных двигателей будут описываться следующими уравнениями:

$$\boldsymbol{u}_s = \boldsymbol{i}_s r_1 + \frac{d}{dt}(L_s \boldsymbol{i}_s + M \cdot \boldsymbol{i}_r) + j\omega_к (L_s \cdot \boldsymbol{i}_s + M \cdot \boldsymbol{i}_r);$$

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{i}_r r_2 + \frac{d}{dt}(M \cdot \boldsymbol{i}_s \cdot L_s \boldsymbol{i}_r) + j(\omega_к - \omega)(M \cdot \boldsymbol{i}_s + L_r \cdot \boldsymbol{i}_r);$$

$$j\frac{d\omega}{dt} = M_д - (M_т - M_с);$$

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F - F_{тр} - c(x_0 + x);$$

$$M_г = \frac{(P_т + F)\mu \cdot R_{ср}}{\sin\frac{\beta}{2}};$$

$$M_д = \frac{3}{2}M \cdot \boldsymbol{i}_s \cdot \boldsymbol{i}_r;$$

$$F = k(\boldsymbol{i}_s + \boldsymbol{i}_r)^2,$$

где

u_s — результирующий вектор напряжения статора;

u_r — результирующий вектор напряжения ротора;

i_s, i_r — результирующий вектор тока соответственно статора и ротора;

$\omega_к$ — угловая скорость вращения координатной системы;

ω — угловая скорость вращения ротора;

$M_д$ — вращающий момент двигателя;

L_s — эквивалентная индуктивность статора $L_s = \frac{3}{2}M + L_{1s}$;

L_r — эквивалентная индуктивность ротора $L_r = \frac{3}{2}M + L_{2s}$;

L_{1s}, L_{2s} — индуктивности рассеяния соответственно статора и ротора;

M — эквивалентная взаимная индуктивность статора и ротора;

$P_т$ — осевое усилие тормозной пружины;

$\frac{\beta}{2}$ — угол конусности тормоза $\frac{\beta}{2} = \frac{R_н - R_в}{b}$ (см. рис. 32);

$R_{ср}$ — средний радиус тормозного шкива;

μ — коэффициент трения.

При составлении дифференциальных уравнений переходных процессов асинхронных двигателей принимаются следующие допущения.

1. Статор и ротор имеют симметричную трехфазную обмотку, причем параметры ротора приведены к цепи статора.

2. Индуктивность обмоток статора и ротора не зависят от расположения обмоток, взаимная индуктивность статора и ротора меняется пропорционально косинусу электрического угла между ними, магнитный поток воздушного зазора синусоидален, влияние высших гармоник отсутствует.

3. Внутренние емкости отсутствуют.

4. Частота тока не оказывает влияния на значения активных сопротивлений и индуктивностей.

Когда ротор неподвижен, уравнения токов имеют вид:

$$\boldsymbol{u}_s = \boldsymbol{i}_s \cdot r_1 + \frac{d}{dt}(L_s \boldsymbol{i}_s + M \cdot \boldsymbol{i}_r);$$

$$0 = \boldsymbol{i}_r \cdot r_2 + \frac{d}{dt}(L_r \cdot \boldsymbol{i}_r + M \boldsymbol{i}_s).$$

В общем виде значения токов $\boldsymbol{i}_s$ и $\boldsymbol{i}_r$ равны.

$$\boldsymbol{i}_s = I_s e^{j\omega_1 t} + A_1 e^{p_1 t} + B_1 e^{p_2 t};$$

$$\boldsymbol{i}_r = I_r e^{t\omega_1 t} + A_2 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t}.$$

При этом существуют следующие соотношения $A_1 \ll B_1$. Поэтому i_s и i_r можно представить в виде:

$$\boldsymbol{i}_s = I_s e^{j\omega_1 t} + B_1 e^{p_2 t};$$

$$\boldsymbol{i}_r = I_r e^{j\omega_1 t} + B_2 e^{p_2 t}.$$

То есть можно считать, что токи $\boldsymbol{i}_s$ и $\boldsymbol{i}_r$, а значит, и $\boldsymbol{i}_m$ возрастают от нуля до установившегося значения по экспоненте. При этом коэффициент затухания p_2 равен:

$$p_2 = -\frac{k_s + k_r}{2\sigma} - \sqrt{\frac{k_s + k_r}{2\sigma} - \frac{k_s \cdot k_r}{\sigma}},$$

где $k_r = \frac{r_2}{L_2}$ — коэффициент затухания ротора;

$k_s = \frac{r_1}{L_1}$ — коэффициент затухания статора;

$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 \cdot L_2}$ — результирующий коэффициент электромагнитной связи.

А так как $F = kI^2_\mu$ и I_μ возрастает от 0 до установившегося значения по экспоненциальному закону, то изменение F во времени будет

$$F_t = F(1 - e^{p_1 t})^2. \qquad \text{(III.1)}$$

Если время втягивания $t_{вт}$ ротора в расточку статора разбить на два слагаемых

$$t_{вт} = t_з + t_п,$$

где $t_з$ — время запаздывания, в течение которого ротор еще неподвижен;

$t_п$ — время перемещения ротора в расточку статора, то время запаздывания $t_з$ можно определить из (III.1). Запишем:

$$F_{тр} = F(1 - e^{p_1 t_з})^2, \qquad \text{(III.2)}$$

где $F_{тр}$ — электромагнитное осевое усилие, при котором ротор начнет втягиваться в расточку статора.

Из (III.2) получим

$$t_з = \frac{1}{p_2} \cdot \ln\left(1 - \sqrt{\frac{F_{тр}}{F}}\right).$$

Поступательное движение ротора начнется, когда электромагнитное усилие будет чуть больше усилий сопротивления, т. е.

$$F_{тр} > cx_0 + F_{тр}.$$

Если учесть, что $t_{раз}$ должно быть во много раз больше времени втягивания, то можно считать, что ротор втягивается в статор при скольжении $s = 1$. В этом случае без учета влияния скольжения осевую силу можно выразить следующей формулой:

$$F = F_0 + kx,$$

где F_0 — осевое усилие при выдвинутом положении ротора;

k — коэффициент, равный $\frac{F - F_0}{x_m}$;

x_m — максимальное перемещение ротора.

Тогда без учета затухающих свободного тока намагничивания уравнение движения ротора в расточку статора примет вид

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = F_0 + kx - F_{\text{тр}} - c(x_0 + x).$$

После интегрирования данного уравнения и некоторых преобразований определится время перемещения ротора в расточку статора:

$$t_{\text{п}} = \frac{2}{\sqrt{\frac{c-k}{m}}}\arcsin\sqrt{\frac{x(c-k)}{2(F_0 - F_{\text{тр}} - cx_0)}}. \qquad \text{(III.3)}$$

Это время фактически зависит от трех параметров: массы ротора, величины перемещения и $\Delta F = F_0 - F_{\text{тр}} - cs_0$ (величина cs_0 — усилие тормозной пружины, обеспечивающей тормозной момент, F_0 — необходимое усилие при пуске двигателя). На рис. 28 представлена зависимость $t_{\text{п}}$ от величины ΔF при различных перемещениях ротора; значения ΔF построены в относительных единицах, причем за единицу взята величина $\Delta F = Q$.

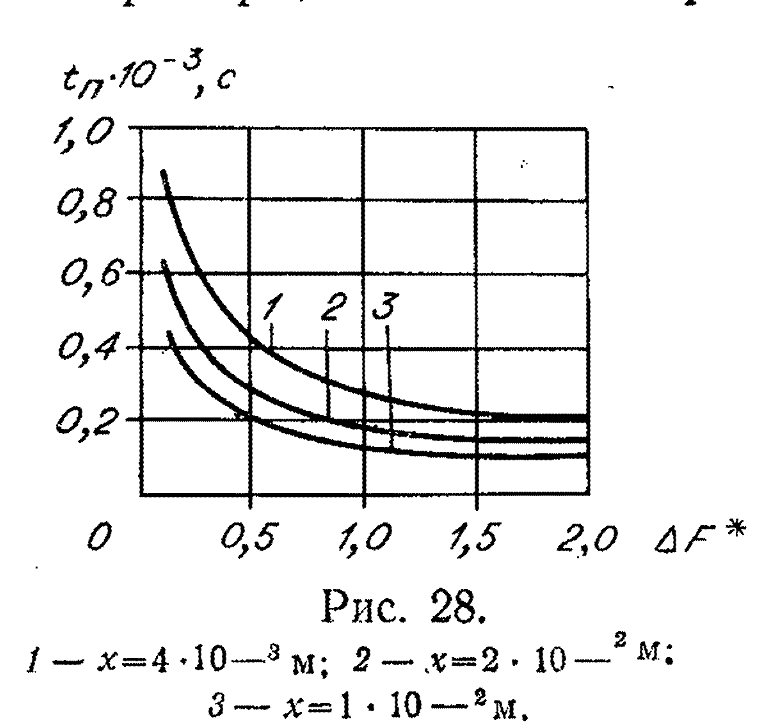


Рис. 28.
1 — $x=4 \cdot 10^{-3}$ м; 2 — $x=2 \cdot 10^{-2}$ м; 3 — $x=1 \cdot 10^{-2}$ м.

Из рисунка видно, что при значении $\Delta F < (0{,}5 \div 0{,}7)Q$ величина времени втягивания резко возрастает. Это значит, что у двигателя будет тяжелый пусковой режим. Поэтому целесообразно подбирать параметры двигателя таким образом, чтобы $\Delta F \geqslant (0{,}5 \div 0{,}7)Q$.

По известному cs_0 можно определить F_0:

$$F_0 = (0{,}5 \div 0{,}7)Q + F_{\text{тр}} + cs_0.$$

Кроме того, необходимо учесть колебания напряжения сети. Обычно двигатели работают без стабилизатора напряжения, тогда минимальная величина осевого усилия в момент пуска двигателя должна быть:

$$F_0 = 1{,}23[(0{,}5 \div 0{,}7)Q + F_{\text{тр}} + cs_0].$$

Принято рассматривать пусковой режим асинхронных двигателей как квазистационарный. При построении характеристики пускового тока не учитываются свободные составляющие пускового тока, т. е. считается, что ротор начал движение при свободных составляющих тока, равных нулю. При этом учитываются изменения параметров двигателя от скольжения. Пусковой момент асинхронных двигателей определяется током и активным сопротивлением ротора [15]. При осевых перемещениях ротора в конусных двигателях (равных 2÷3 мм), как показывают расчеты [15], пусковой ток ротора фактически не изменяется. А так как r_2 не зависит от y, то и $M_п \approx \mathrm{const}$ при перемещениях ротора в указанных пределах. Это же показывают расчеты, проведенные по формуле $M_д = \frac{3}{2} M \boldsymbol{i}_s \cdot \boldsymbol{i}_r$.

Однако в случае пуска конусных двигателей его индуктивность, как уже отмечалось выше, меняется как от изменения скольжения s, так и от осевого перемещения y, которое в свою очередь зависит от времени перемещения ротора в расточку статора. Поэтому при расчете характеристики пускового тока конусных двигателей необходимо учитывать изменения параметров двигателя от обоих этих факторов. Для этого выразим параметры двигателя через y.

Взаимная индуктивность конусного двигателя равна

$$M = \frac{m\mu_0 Dl}{a_k \pi k_\delta \delta \cdot k_\mu \cos\alpha} \left(\frac{W_1}{p}\right)^2$$

с учетом осевых перемещений ротора

$$M = \frac{\mu_0 mD (l - y\cos^2\alpha)}{\pi k_\delta k_\mu \cos\alpha (\delta + y\sin\alpha)} \left(\frac{W_1}{p}\right)^2$$

где p — число пар полюсов;

W_1 — число эффективных витков обмотки статора;

m — число фаз.

Соответственно сопротивление взаимной индуктивности равно

$$x_m = \frac{\mu_0 2fmD (l - y\cos^2\alpha)}{k_\delta \delta k_\mu \cos\alpha (\delta + y\sin\alpha)} \left(\frac{W_1}{p}\right)^2$$

Индуктивность рассеяния статора равна

$$L_{1s} = \frac{\mu_0 2lW_1^2}{pq\cos\alpha} (\lambda_{1n} + \lambda_{1z} + \lambda_{1l}),$$

где λ_{1n} — коэффициент проводимости рассеяния паза;

λ_{1z} — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния;

λ_{1l} — коэффициент проводимости лобового рассеяния.

Коэффициенты проводимости пазового и лобового рассеяния не зависят от осевых перемещений ротора и для конусного двигателя соответственно равны аналогичным коэффициентам двигателей нормального исполнения.

Дифференциальное рассеяние обусловлено высшими гармониками поля, связывающего статор с ротором. В этом случае надо учитывать изменения геометрических размеров двигателя при осевых перемещениях ротора.

Если $\lambda_{1z} = \frac{kt_{1ср}}{k_\delta \delta}$, то с учетом осевых перемещений ротора

$$\lambda_{1z} = \frac{kt_{1ср}}{k_\delta (\delta + y \sin \alpha)}.$$

Теперь:

$$L_{1s} = \frac{\mu_0 2W_1^2 (l - y \cos^2 \alpha)}{pq \cos \alpha} \left[\frac{t_{1ср} \cdot k}{(\delta + y \sin \alpha) k_\delta} + \lambda_{1n} + \lambda_{1t} \right].$$

Индуктивное сопротивление рассеяния соответственно равно

$$x_1 = \mu_0 \frac{2\omega W_1^2 (l - y \cos^2 \alpha)}{pq \cos \alpha} \left[\frac{t_{1ср} \cdot k}{(\delta + y \sin \alpha) k_\delta} + \lambda_{1n} + \lambda_{1l} \right].$$

Для короткозамкнутого двигателя индуктивность рассеяния ротора определяется

$$L_{2s} = 7{,}9 \frac{2m_1 l W_1^2}{\pi z_2 \cos \alpha} (\lambda_{2n} + \lambda_{2l} + \lambda_{2z}),$$

где λ_{2n} — коэффициент проводимости рассеяния пазов;

λ_{2l} — коэффициент проводимости рассеяния лобовых частей;

λ_{2z} — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния. Коэффициенты проводимости рассеяния паза и лобовых частей ротора не зависят от осевых перемещений, а проводимость дифференциального рассеяния ротора

$$\lambda_{2z} = \frac{t_{2ср} \cdot k}{(\delta + y \sin \alpha) k_\delta}.$$

Теперь индуктивность рассеяния ротора

$$L_{2s}=7{,}9\,\frac{2m_1\,(l-y\cos^2\alpha)\,W_1^2}{\pi z_2\cos\alpha}\left[\lambda_{2n}+\lambda_{2l}+\frac{t_{2\text{ср}}\cdot k}{(\delta+y\sin\alpha)\,k_\delta}\right]$$

и индуктивное сопротивление рассеяния ротора

$$x_2=7{,}9\,\frac{2m_1\omega\,(l-y\cos^2\alpha)\,W_1^2}{z_2\cdot\cos\alpha}\left[\lambda_{2n}+\lambda_{2l}+\frac{t_{2\text{ср}}\cdot k}{(\delta+y\sin\alpha)\,k_\delta}\right].$$

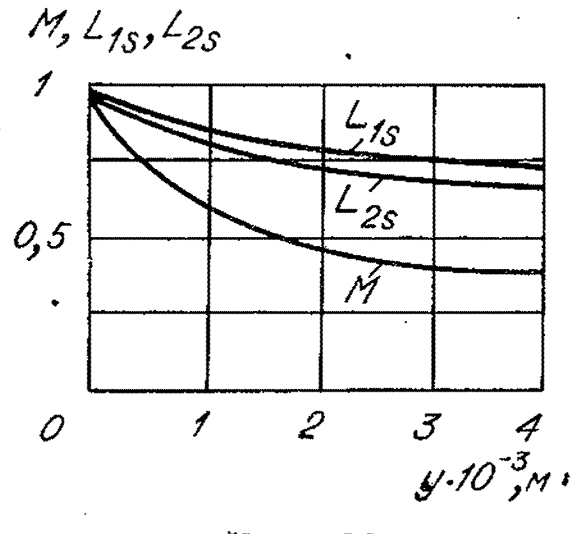


Рис. 29.

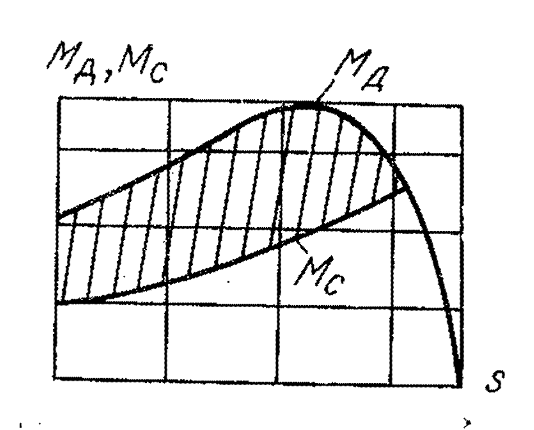


Рис. 30.

На рис. 29 изображены $M=f(y)$, $L_{1s}=f(y)$, $L_{2s}=f(y)$. Найдем зависимость осевого перемещения y от скольжения s.

Из (III.3) определим $x=f(t)$:

$$x=\frac{F_0-F_{\text{тр}}-c\cdot\Delta s}{c-k}\left(1-\cos t\sqrt{\frac{c-k}{m}}\right). \qquad \text{(III.4)}$$

Выразим перемещение y через x

$$y=y_m-x$$

и подставим это значение в (III.4):

$$y=y_m-\frac{F_0-F_{\text{тр}}-c\cdot\Delta s}{c-k}\left(1-\cos t\sqrt{\frac{c-k}{m}}\right).$$

Теперь параметры двигателя можно выразить в функции времени

$$x_m=\mu_0\,\frac{2mf\left\{l-\left[y_m-\dfrac{F_0-F_{\text{тр}}-c\cdot\Delta s}{c-k}\left(1-\cos t\sqrt{\dfrac{c-k}{m}}\right)\right]\cos^2\alpha\right\}}{k_\delta k_\mu\cos\alpha\left\{\delta+\left[y_m-\dfrac{F_0-F_{\text{тр}}-c\cdot\Delta s}{c-k}\left(1-\cos t\sqrt{\dfrac{c-k}{m}}\right)\right]\sin\alpha\right\}}\cdot\left(\frac{W}{p}\right)^2;$$

$$x_1 = \mu_0 \frac{2\omega W_1^2 \left\{ l - \left[y_m - \frac{F_0 - F_{\text{тр}} - cx_0}{c-k} \left(1 - \cos t \sqrt{\frac{c-k}{m}} \right) \right] \right\}}{pq \cos \alpha} \times$$

$$\times \left\{ \left\{ \frac{t_{1\text{ср}}\, k}{\left\{ \delta + \left[y_m - \frac{F_0 - F_{\text{тр}} - cx_0}{c-k} \left(1 - \cos t \sqrt{\frac{c-k}{m}} \right) \right] \right\}} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \lambda_{1n} + \lambda_{1l} \right\} \right\};$$

$$x_2 = \frac{7{,}9 \cdot 2W_1^2 \omega m \left\{ l - \left[y_m - \frac{F_0 - F_{\text{тр}} - cx_0}{c-k} \left(1 - \cos t \sqrt{\frac{c-k}{m}} \right) \right] \right\}}{z_2 \cdot \cos \alpha} \times$$

$$\times \left\{ \left\{ \frac{t_{2\text{ср}} \cdot k}{\delta + \left[y_m - \frac{F_0 - F_{\text{тр}} - cx_0}{c-k} \left(1 - \cos t \sqrt{\frac{c-k}{m}} \right) \right]} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \lambda_{1n} + \lambda_{1l} \right\} \right\}.$$

Если длина ротора больше длины статора на величину осевых перемещений y, тогда формулы для определения M, x_m, L_{1s}, L_{2s}, x_1, x_2 в функции перемещения y и времени t соответственно примут вид

$$M = \frac{\mu_0 m D l}{\pi k_\delta k_\mu \cos \alpha (\delta + y \sin \alpha)} \left(\frac{W_1}{p} \right)^2;$$

$$x_m = \frac{\mu_0 2 m f l D \left(\frac{W_1}{p} \right)^2}{\pi k_\delta \cdot k_\mu \cos \alpha \left\{ \delta + \left[y_m - \frac{F_0 - F_{\text{тр}} - cx_0}{c-k} \right.\right.} \rightarrow$$

$$\rightarrow \overline{\left. \left. \left(1 - \cos t \sqrt{\frac{c-k}{m}} \right) \right] \sin \alpha \right\}};$$

$$x_1 = \frac{\mu_0 2 \omega W_1^2 l}{pq \cos \alpha} \left\{ \frac{t_{1\text{ср}} \cdot k}{\delta + \left[y_m - \frac{F_0 - F_{\text{тр}} - cx_0}{c-k} \left(1 - \cos t \sqrt{\frac{c-k}{m}} \right) \right]} + \right.$$

$$\left. + \lambda_{1n} + \lambda_{1l} \right\};$$

$$x_2 = \frac{7{,}9 \cdot 2W_1^2 \omega ml}{z_2 \cdot \cos\alpha} \left\{ \frac{t_{2\text{ср}} \cdot k}{\delta + \left[y_m - \frac{F_0 - F_{\text{тр}} - cx_0}{c - k} \left(1 - \cos t \sqrt{\frac{c-k}{m}}\right)\right]} + \lambda_{1n} + \lambda_{1l} \right\};$$

$$L_{1s} = \frac{\mu_0 2W_1^2 l}{pq \cos\alpha} \left[\frac{t_{1\text{ср}} \cdot k}{(\delta + y \sin\alpha) k_\delta} + \lambda_{1n} + \lambda_{1l} \right];$$

$$x_1 = \frac{\mu_0 2\omega W_1^2 l}{pq \cos\alpha} \left[\frac{t_{1\text{ср}} \cdot k}{(\delta + y \sin\alpha) k_\delta} + \lambda_{1n} + \lambda_{1l} \right];$$

$$x_2 = \frac{7{,}9 \,.\, 2\omega ml}{z_2 \cos\alpha} \left[\lambda_{2n} + \lambda_{2l} + \frac{t_{2\text{ср}} \cdot k}{(\delta + y \sin\alpha) k_\delta} \right];$$

$$L_{2s} = \frac{7{,}9 \,.\, 2m_1 W_1^2 l}{\pi z_2 \cos\alpha} \left[\lambda_{2n} + \lambda_{2l} + \frac{t_{2\text{ср}} \cdot k}{(\delta + y \sin\alpha) k_\delta} \right].$$

Остается определить зависимость скольжения от времени $s = f(t)$.

Время, соответствующее изменению скольжения от s_1 до s_2, равно [16]:

$$t = T_j \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{m_{\text{из}}}; \qquad T_j = \frac{jn_0^2}{91p}, \tag{III.5}$$

где j — момент инерции всего агрегата;

n_0 — асинхронная скорость вращения ротора;

$m_{\text{из}}$ — относительный избыточный момент.

$$m_{\text{из}} = \frac{M_{\text{из}}}{M_{\text{н}}},$$

где $M_{\text{из}}$ — избыточный момент двигателя, равный $M_{\text{из}} = M_{\text{д}} - M_{\text{с}}$;

$M_{\text{н}}$ — номинальный вращающий момент двигателя, т. е. для определения $M_{\text{из}}$ надо построить характеристику моментов $M_{\text{д}}$ и $M_{\text{с}}$ (рис. 30).

Таким образом, надо знать изменение вращающего момента $M_{\text{д}}$ в зависимости от скольжения s. Так как момент конусного двигателя не изменяется при осевых перемещениях ротора, то

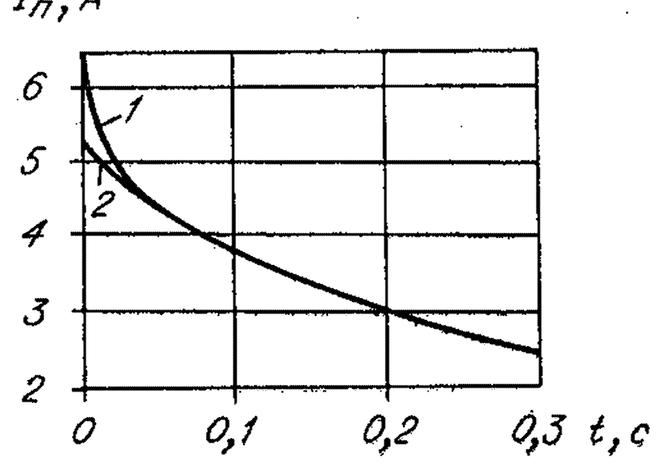


Рис. 31.

1 — пуск при роторе, выдвинутом из расточки статора; 2 — нормальный пуск.

строим кривую $M=f(s)$ для случая, когда ротор втянут в расточку статора.

Возьмем интеграл (III.5) при $s_1=1$ (s_1 изменяется от 1 до $s_н$). Так как в общем случае $m_{из}=f(s)$, то интеграл надо брать графически. Одновременно строим $t=f(s)$. Теперь, имея x_1, x_2, $x_m=f(t)$ и $s=f(t)$, мы сможем построить x_1, x_2, $x_m=f(s)$. Нужно помнить, что при $t>t_п$, x_1, x_2, x_m не зависят от t.

Теперь при построении характеристики пускового тока [15] индуктивное сопротивление для различных значений s надо брать по кривой x_1, x_2, $x_m=f(s)$.

На рис. 31 показана характеристика пускового тока двигателя, построенная для двух случаев пуска: ротор втянут в расточку статора (кривая 2) и ротор выдвинут из статора (кривая 1). Так как $t_п \ll t_{раз}$, то, как видно на рис. 31, превышения пускового тока при выдвижении ротора из расточки статора незначительны.

Отметим, что относительное увеличение пускового тока конусных двигателей будет уменьшаться с увеличением мощности двигателей. Действительно, поскольку в основном возрастание тока зависит от увеличения воздушного зазора, то процентное приращение воздушного зазора при одинаковых углах односторонней конусности при осевых перемещениях будет зависеть от номинального воздушного зазора δ, который в свою очередь зависит от мощности двигателя.

Глава IV

ПРОЦЕСС ТОРМОЖЕНИЯ

Электродвигатели с конусным ротором предназначены для определенного режима работы с учетом возможного и точного торможения, которое характеризуется двумя основными параметрами: тормозным моментом $M_т$ и временем срабатывания $t_т$. Поэтому для обеспечения заданного режима конусные двигатели должны создавать расчетный момент торможения и время срабатывания.

В конусных двигателях применяются конусные тормоза, поэтому тормозной момент определяется [1] по формуле

$$M_т=\frac{P_т \cdot R_{ср} \cdot \mu}{\sin\frac{\beta}{2}},$$

где $R_{ср}$ — средний радиус тормозного шкива

$$R_{ср} = \frac{R_н + R_в}{2}$$

(рис. 32);

$P_т$ — осевое усилие, действующее на тормоз;

$\frac{\beta}{2}$ — угол конусности конусного тормоза;

$$\frac{\beta}{2} = \frac{R_н - R_в}{b};$$

μ — коэффициент трения.

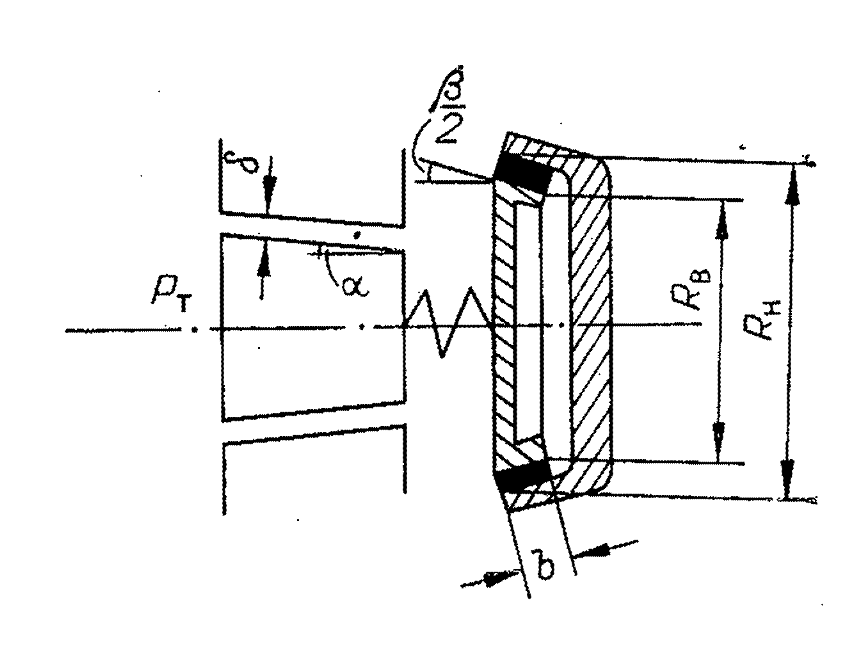


Рис. 32.

Тормозной момент $M_т$ определяется из условия обеспечивания торможения в статическом положении $M_н$ с учетом коэффициента запаса торможения k, который выбирается согласно положениям технического надзора:

$$M_т = M_н \cdot k.$$

Желательно заданный момент торможения получить при минимальном угле односторонней конусности α (минимальном $P_т$), так как с уменьшением α повышаются энергетические характеристики двигателя. Однако существуют ограничения для выбора параметров тормоза. Из условия предотвращения заклинивания конусных поверхностей угол конусности $\frac{\beta}{2}$ должен быть больше угла трения ρ, который равен:

$$\rho = \operatorname{arctg} \mu.$$

Учитывая увеличение коэффициента трения μ при нагреве в пределах 15÷20%, минимальный угол трения следует принимать

$$\frac{\beta}{2} = \operatorname{arctg}(1,2\mu);$$

обычно $\frac{\beta}{2} > 10°$.

Для соотношения размеров тормоза существуют требования $R_в/R_н = 0,6 \div 0,8$; $b/R_{ср} = 0,3 \div 0,2$, выведенные из условия неравномерного износа и нагрева тормоза [17].

Для нормального включения тормоза усилие пружины должно быть равно:

$$F_{пр} = P_т + F_{тр},$$

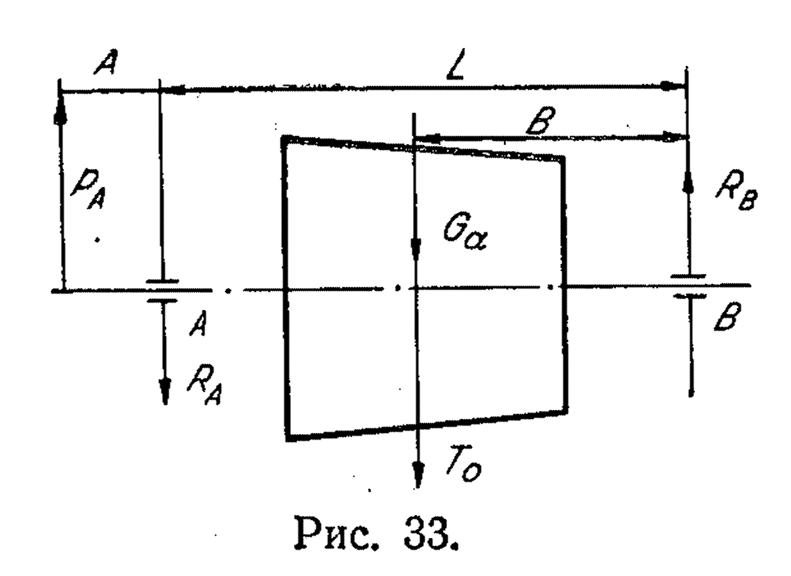


Рис. 33.

где $F_{тр}$ — сила трения, которая состоит из двух составляющих: силы трения ротора о воздух и силы трения скольжения в опорах. Так как скорость перемещения ротора в осевом направлении невелика, то первой составляющей можно пренебречь.

Сила трения в опорах определится по формуле [17]

$$P_A = R_A f;\ P_B = R_B f,$$

где P_A — сила трения в опоре A; P_B — сила трения в опоре B (рис. 33);

f — коэффициент трения скольжения в опорах;

R_A — реакция в опоре A;

R_B — реакция в опоре B.

В свою очередь

$$R_A = \frac{-P_н (A+L) + G_a \cdot B}{L}, \qquad R_B = \frac{G_a (L-B) + P_н A}{L},$$

где G_a — вес ротора;

$P_н$ — натяжение ремня или сила давления на зуб шестерни на конце вала со стороны привода.

Для ременной передачи $P_н$ равно:

$$P_н = M_н \cdot \frac{c_р}{D_р},$$

где $D_р$ — возможный минимальный диаметр шкива;

$c_р$ — коэффициент, равный 3,6 для клиноременной и 6 для плоскоременной передачи. Для зубчатой передачи $P_н$ равно:

$$P_н = \frac{2M_н}{d_ш \cos\gamma},$$

где $d_ш$ — возможный минимальный диаметр начальной окружности шестерни; γ — угол зацепления шестерни.

При определении $F_{тр}$ в момент пуска необходимо учитывать силу одностороннего магнитного притяжения T_0 [2,17]. Для конусных двигателей

$$T_0 = \frac{\pi D l}{2\delta \cdot k_\delta}\left(\frac{B_\delta \cdot \beta}{5000}\right)^2 l_0,$$

где l_0 — первоначальный эксцентриситет.

Максимальный эксцентриситет оси вала равен:

$$l = l_1 + l_0,$$

где l_1 — стрела прогиба вала

$$l_1 = \frac{(G_a + T_0)\varphi_1 + P_н\varphi_2}{l - t_y \cdot \varphi_1}, \qquad t_y = \frac{T_0}{l_0};$$

$\varphi_1 = \frac{3l^2B - 4B^3}{48EI}$ — прогиб середины вала от единичной силы, приложенной к середине пакета (см. рис. 33);

$\varphi_2 = \frac{l^2A}{16EI}$ — прогиб середины вала от единичной силы, приложенной к середине шестерни или шкива;

E — модуль продольной упругости материала;

I — осевой момент инерции сечения сердечника с учетом жесткости от напрессовки ротора.

Максимальная сила одностороннего магнитного притяжения равна:

$$T_м = t_y \cdot l.$$

Таким образом, с учетом силы магнитного притяжения реакция в опорах A и B соответственно равна:

$$N_A = \frac{-P_н(A + l) + (G_a + T_м)B}{l};$$

$$N_B = \frac{(G_a + T_м)(l - B) + P_н}{l}.$$

Пружина развивает осевое усилие

$$F_{пр} = c(x_0 + x),$$

где c — жесткость пружины;

x_0 — предварительное поджатие пружины;

x — дополнительное поджатие пружины за счет осевых перемещений ротора после пуска под действием электромагнитных сил.

Рассмотрим процесс выхода ротора на тормоз.

В рабочем состоянии электромагнитные силы удерживают ротор в притянутом положении, преодолевая силы упругости пружины. При отключении питания двигателя от сети пружина разжимается, преодолевая силу инерции и трение ротора в опорах и сопротивление воздуха, перемещает ротор вместе с тормозным диском на тормоз. Ротор быстро проходит расстояние между двумя тормозными дисками. Упругие силы пружины прижимают ротор к тормозному диску. Если тормозной момент при этом больше момента инерции вращающихся масс, то происходит быстрый останов ротора.

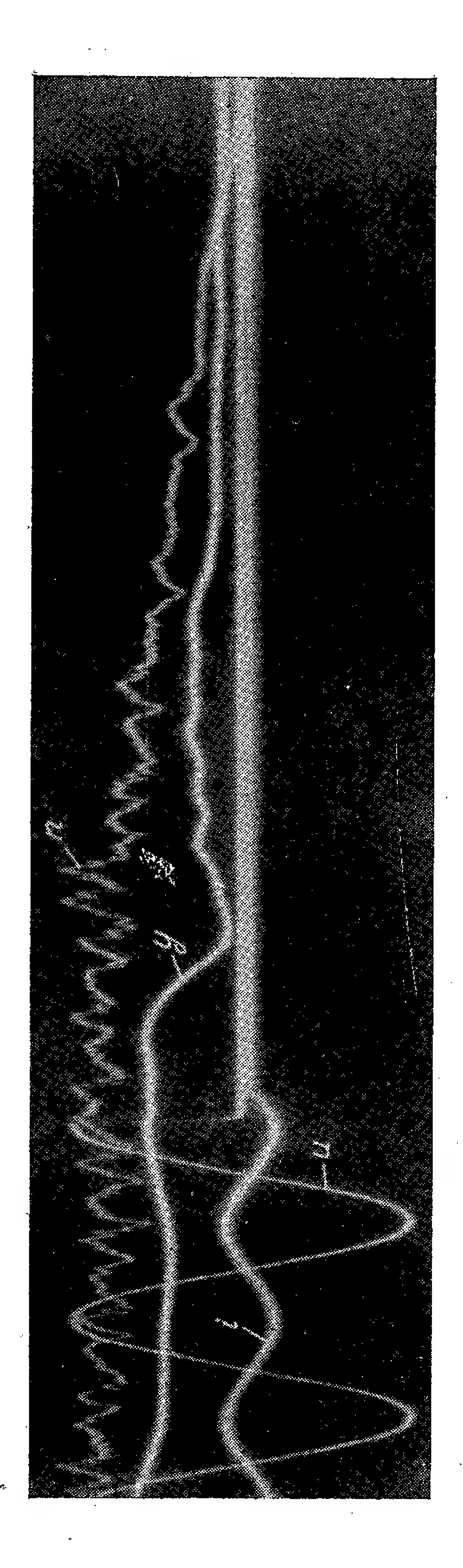


Рис. 34.

Следует отметить, что после отключения питания двигателя ротор начнет двигаться не сразу, а в тот момент, когда сила пружины будет больше сил, удерживающих ее в сжатом состоянии.

Эти силы состоят из сил трения и электромагнитной силы, которая создается переходными токами двигателя при отключении.

Таким образом, полное время торможения $t_{тр}$ можно разбить на три составляющие:

$$t_{тор} = t_{трог} + t_{дв} + t_{ос},$$

где $t_{трог}$ — время трогания, за которое ток в обмотке двигателя уменьшится до величины, при которой ротор начнет двигаться на тормоз;

$t_{дв}$ — время движения, необходимое для перемещения ротора от момента трогания до соприкосновения тормозного кольца с тормозом;

$t_{ос}$ — время останова, необходимое для торможения вращающихся масс от момента соприкосновения тормозного кольца с тормозом до полного останова масс.

На осциллограмме торможения двигателя (рис.

34) четко выражены все три компоненты времени торможения.

Как уже отмечалось, ротор начнет перемещаться в осевом направлении в тот момент, когда усилие пружины уравновешивается силами сопротивления — силой трения и силой магнитного притяжения, т. е.

$$F_{пр}=F_{тр}+F_{трог},$$

где $F_{пр}$ — упругие силы пружины в начале перемещения ротора;

$F_{трог}$ — электромагнитная сила, при которой ротор начинает перемещаться в осевом направлении.

Так как силы трения $F_{тр}$ не зависят от напряжения сети, то при отключении двигателя от источника питания время трогания определяется изменением только осевой электромагнитной силы F. Отсюда для отыскания времени трогания надо рассчитывать время, за которое осевое усилие F уменьшится до величины $F_{трог}$, при которой ротор начнет перемещаться на тормоз. Как было выведено выше, осевое усилие конусного двигателя пропорционально квадрату индукции воздушного зазора:

$$F \equiv B_{\delta}^2.$$

Выразим магнитную индукцию через намагничивающий ток, тогда после соответствующих преобразований получим:

$$F=\frac{k}{k_{\mu}} I_{\mu}^2, \qquad \text{(IV.1)}$$

где k_{μ} — общий коэффициент насыщения;

k — коэффициент пропорциональности, зависит от параметров двигателя.

Если принять, что коэффициент k_{μ} не зависит от напряжения на зажимах статора, то для определения $t_{трог}$ остается выяснить зависимость тока намагничивания от времени при отключении питания. Это означает, что практически надо рассчитывать переходные токи двигателя после отключения его от питающей сети.

За начало отсчета времени ($t=0$) берем время полного разрыва контактов. В [8] показано, что в этот момент потокосцепление ротора остается равным потокосцеплению до начала отключения напряжения, т. е.

$$\dot{\Psi}_{2_0}=\dot{\Psi}_2,$$

где $\dot{\Psi}_{2_0}$ — результирующий вектор потокосцепления ротора в момент полного разрыва контактов;

$\dot{\Psi}_2$ — результирующий вектор потокосцепления ротора в момент начала разрыва контактов.

Запишем уравнения для определения $\dot{\Psi}_{2_0}$ и $\dot{\Psi}_2$:

$$\dot{\Psi}_{2_0} = M \cdot \dot{I}_{s_0} + L_1 \cdot \dot{I}_{r_0};$$

$$\dot{\Psi}_2 = M \cdot \dot{I}_s + L_2 \cdot \dot{I}_r,$$

где I_{s_0} — результирующий вектор тока статора в момент полного разрыва контактов (равен нулю);

$\dot{I}_{r_0}$ — результирующий вектор тока ротора, приведенный к обмотке статора в момент полного разрыва контактов;

I_s — результирующий вектор тока статора до начала выключения (установившийся ток статора):

I_r — результирующий вектор тока ротора, приведенный к обмотке статора до начала выключения (установившийся ток ротора):

M — эквивалентная взаимная индуктивность ротора и статора;

L_2 — эквивалентная индуктивность ротора, приведенная к обмотке статора.

Из данных уравнений найдем:

$$\dot{I}_{r_0} = \dot{I}_r + \frac{M}{L_2} \cdot \dot{I}_s .$$

Намагничивающий ток $\dot{I}_\mu$ равен:

$$\dot{I}_\mu = \dot{I}_s + \dot{I}_r.$$

При допущении $M \approx L_2$ имеем $\dot{I}_\mu = \dot{I}_{r_0}$.

Так как после размыкания контактов ток статора равен нулю, то после отключения напряжения намагничивающий ток равен току ротора.

В координатной системе, вращающейся вместе с ротором, после полного отключения напряжения имеем:

$$0 = i_\mu \cdot r_2 + L_2 \frac{di_\mu}{dt}, \qquad \text{(IV.2)}$$

где r_2 — активное сопротивление ротора.

Без учета насыщения:

$$i_\mu = I_\mu \cdot e^{-\frac{r_2}{L_2} \cdot t}. \qquad \text{(IV.3)}$$

Подставив значение i_μ из (IV.3) в (IV.1), получим:

$$F(t) = F \cdot e^{-\frac{2r_2}{L_2} \cdot t}. \qquad \text{(IV.4)}$$

Теперь $F_{\text{трог}} = F \cdot e^{-\frac{2r_2}{L_2} \cdot t_{\text{трог}}}$

Откуда $t_{\text{трог}} = \frac{L_2}{2r_2} \cdot \ln \frac{F}{F_{\text{пр}} - F_{\text{тр}}}$

Для учета насыщения рассчитаем и построим $k_\mu = f(I_\mu)$ (рис. 35). Аппроксимируем данную кривую пара-

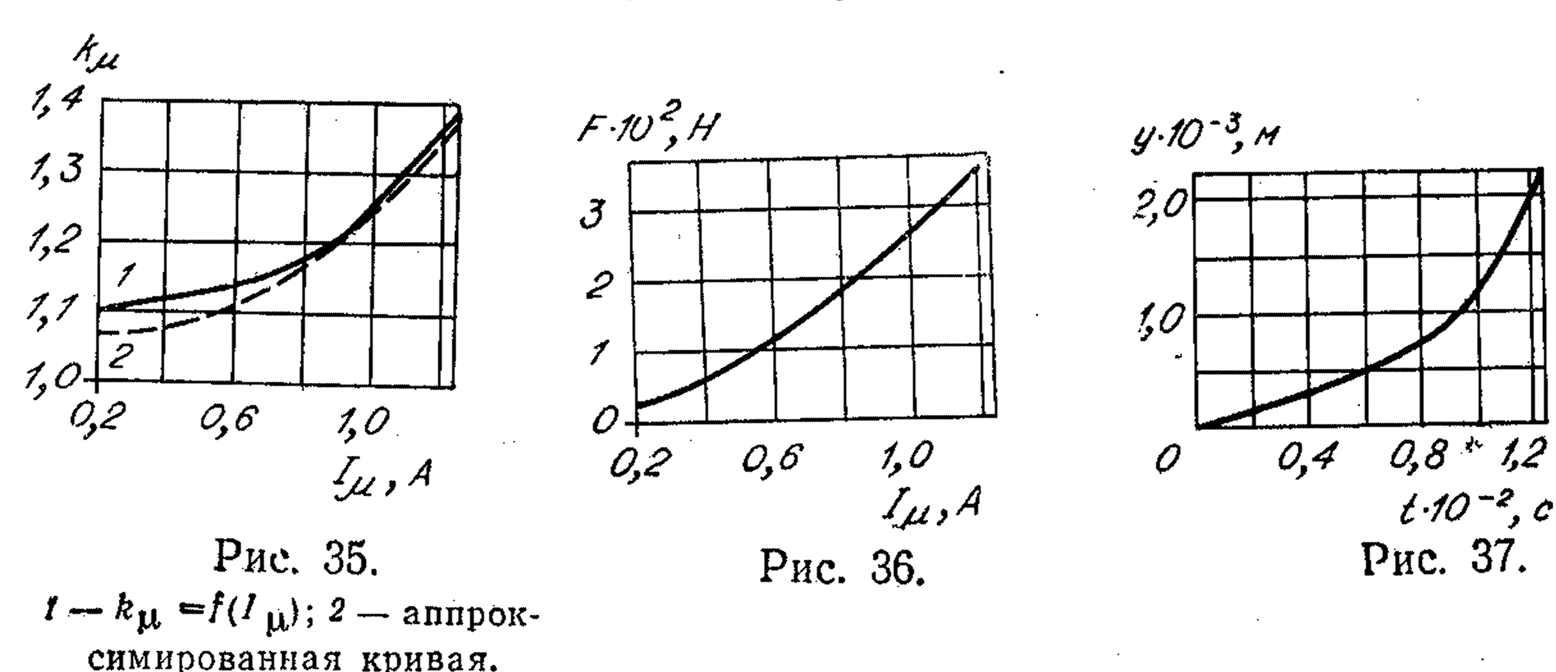


Рис. 35.
1 — $k_\mu = f(I_\mu)$; 2 — аппроксимированная кривая.

Рис. 36.

Рис. 37.

болой вида $y = ax^2 + c$. Таким образом, аналитическое выражение $k_\mu = f(I_\mu)$ запишется в следующем виде:

$$k_\mu = aI_\mu^2 + c$$

Коэффициенты a и c находятся методом выбранных точек. Так как M обратно пропорциональна k_μ, то L_2 можно выразить в следующем виде:

$$L_2 = \frac{A}{aI_\mu^2 + c} + L_{2s}, \qquad \text{(IV.5)}$$

где L_{2s} — индуктивность рассеяния ротора;
A — коэффициент пропорциональности,

$$A = \frac{sm\mu_0 nl}{2\pi k_\delta \delta}\left(\frac{W_1}{p}\right)^2$$

m — число фаз;
W_1 — число витков обмотки статора;
P — число пар полюсов.

Индуктивность рассеяния ротора также зависит от насыщения магнитной цепи, но так как $L_{2s} \ll M$, то этой зависимостью можно пренебречь.

После подстановки L_2 из (IV.5) в (IV.2) получим:

$$\left(L_{2s} + \frac{A}{ai_\mu^2 + c}\right) \cdot \frac{di_\mu}{dt} + i_\mu \cdot r_2 = 0.$$

Решая это уравнение методом разделения переменных, найдем

$$t_{\text{трог}} = \frac{A}{2rc} \ln \frac{(ai_{\mu\ \text{трог}}^2 + c) I_\mu^2}{i_{\mu\ \text{трог}}^2 (aI_\mu^2 + c)} + \frac{L_{2s}}{r} \ln \frac{I_\mu}{i_{\mu\ \text{трог}}},$$

где $i_{\mu\text{трог}}$ — ток намагничивания ротора в момент равенства осевых сил, действующих на ротор, т. е. когда $F_{\text{пр}} = F_{\text{тр}} + F_{\text{трог}}$.

Для определения $i_{\mu\text{трог}}$ строим зависимость $F = f(i_\mu)$ (рис. 36) и на полученной кривой определяем $i_{\mu\text{трог}}$, соответствующий $F_{\text{трог}}$.

Для определения времени движения составим дифференциальное уравнение движения системы «пружина — ротор»:

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = c(s_0 - y) - F_{\text{тр}} - F(t), \qquad \text{(IV.6)}$$

где m — масса движущихся частей (ротора);

s — величина максимального сжатия пружины $s = s_0 + \Delta s$, максимальное перемещение ротора y_m равно Δs;

$F(t)$ — затухающая электромагнитная сила, которую можно определить из (IV.4).

Уравнение (IV.6) целесообразно решать методом итераций. Приближенное решение, полученное при условии $F(t) = 0$, будет

$$y_{\text{п}} = \frac{(cs - F_{\text{тр}})}{c} \cdot \left(1 - \cos \sqrt{\frac{c}{m}} \cdot t\right). \qquad \text{(IV.7)}$$

Поставим значение $y_{\text{п}}$ в (IV.6) и, проинтегрировав данное уравнение, получим:

$$y = \frac{(cs - F_{\text{тр}})}{c}\left(1 - \cos \sqrt{\frac{c}{m}} \cdot t\right) - \frac{F(e^{pt} - 1 - t)}{p^2 m}, \qquad \text{(IV.8)}$$

где p — коэффициент затухания, равный $-\frac{2r_2}{L_2}$.

Уравнение (IV.8) трансцендентно. Поэтому для определения времени движения ротора строим зависимость $y=f(t)$ (рис. 37). По данной кривой определяем $t_{дв}$, соответствующее величине перемещения y.

Без учета затухающей электромагнитной силы время движения ротора на тормоз определяется из (IV.7):

$$t_{дв}=2\sqrt{\frac{m}{c}}\arcsin\sqrt{\frac{yc}{2(cs-F_{тр})}}$$

Для определения времени останова обратимся к дифференциальному уравнению вращения ротора после отключения напряжения:

$$J\frac{d\omega}{dt}=-M_{с} \qquad \text{(IV.9)}$$

где J — момент инерции вращающихся масс;

ω — угловая скорость вращения ротора;

$M_{с}$— момент сопротивления всего агрегата.

Если двигателю добавить дополнительный тормозной момент $M_{т}$, что наблюдается в конусных двигателях, то (IV.9) примет вид:

$$J=\frac{d\omega}{dt}=-M_{с}-M_{т},$$

где $M_{т}$ — момент торможения ротора конусного двигателя, развиваемый энергией сжатой пружины, который зависит от размеров конусного тормоза и осевого усилия пружины [1]:

$$M_{т}=\frac{F_{пр}\cdot\mu\cdot R_{ср}}{\sin\frac{\beta}{2}}$$

Так как тормозные конусные двигатели применяются в приводах, у которых $M_{с}=\text{const}$, то время останова равно:

$$t=\int\limits_{\omega'}^{0}\frac{d\omega}{M_{с}+M_{т}} \qquad \text{(IV.10)}$$

В (IV.10) учтено, что с момента отключения напряжения питания двигателя до начала интенсивного торможения ротора, т. е. до выхода ротора на тормоз, пройдет время,

равное $t_{трог}+t_{дв}$, за которое ротор уменьшит свою скорость вращения до ω'. Поэтому в (IV.10) пределы интегрирования взяты от ω' до нуля.

После интегрирования получим

$$t_{ос} = \frac{J\omega'}{M_с + M_т}. \qquad (IV.11)$$

Значение угловой скорости вращения ротора в момент выхода ротора на тормоз ω' определяется из (IV.9):

$$\omega' = \omega - \frac{(t_{тр} + t_{дв}) M_с}{J}.$$

Подставим это значение в формулу (IV.11):

$$t_{ос} = \frac{J\omega}{M_с + M_т} - \frac{(t_{тр} + t_{дв}) M_с}{M_с + M_т}.$$

Вместо момента инерции и угловой скорости вращения удобнее использовать соответственно маховой момент QD^2 и скорость вращения ротора n. В этом случае предыдущее выражение примет вид

$$t_{ос} = \frac{QD^2 \cdot n_2}{375(M_с + M_т)} - \frac{M_с (t_{тр} + t_{дв})}{M_с + M_т}.$$

Полученное выражение позволяет рассчитать время останова конусного двигателя $t_{ос}$.

Время торможения зависит от величины конуса ротора: $t_{тор} = f(\alpha)$ (рис. 38). Эта зависимость аппроксимируется функцией $t_{тор} = t_{дв} + t_{трог} + \frac{k}{\alpha}$. На кривой можно

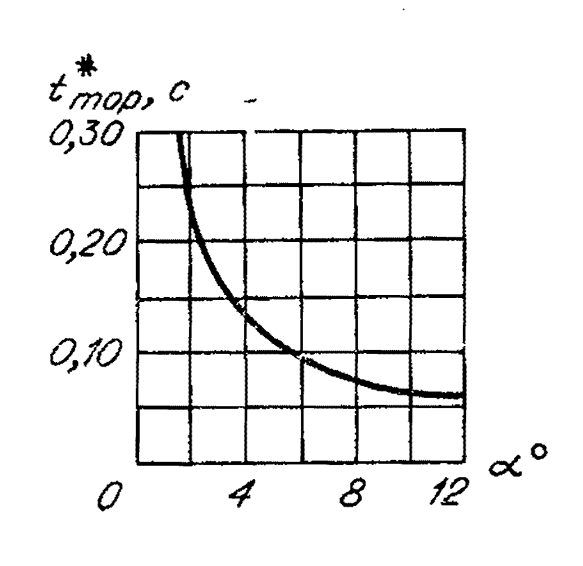


Рис. 38.

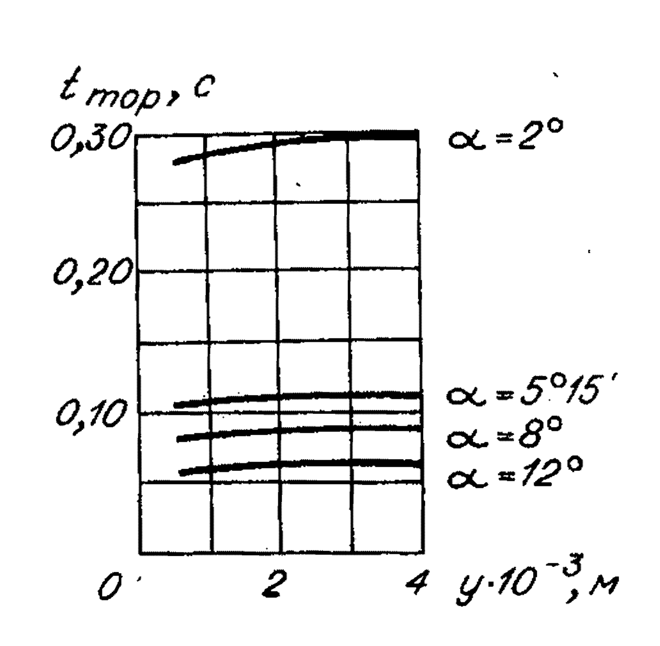


Рис. 39.

выделить характерные участки. При малых углах $\alpha \leqslant 2^\circ$ дополнительный тормозной момент мал и $t_{тор}$ приближается ко времени торможения при свободном выбеге механизма. При $\alpha \geqslant 10^\circ$ абсолютное уменьшение времени торможения резко замедляется. Теоретически при больших углах α $t_{тор} = t_{трог}$. Участок кривой $t_{тор} = f(\alpha)$ при $2^\circ \leqslant \alpha \leqslant 10^\circ$ можно назвать областью интенсивного уменьшения $t_{тор}$. Отметим, что так как $F \equiv \operatorname{tg} \alpha$, а при малых значениях этого угла $\operatorname{tg} \alpha = \alpha$, то зависимость $t_{тор} = f(\alpha)$, по существу, является одновременно $t_{тор} = f(F)$.

С течением времени у конусных двигателей стирается тормозная прокладка, что равносильно увеличению хода ротора на тормоз, поэтому важно знать зависимость $t_{тор} = f(y)$. Из рис. 39 видно, что увеличение перемещения от 1 до 4 мм мало влияет на величину $t_{тор}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРИМЕР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РАСЧЕТА ДВИГАТЕЛЯ

Расчет двигателя приведен в соответствии с рекомендациями норм ВНИИЭМ. В основу взят базисный двигатель.

НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ АКТИВНОЙ ЧАСТИ

1. Номинальные данные.

Полезная мощность $P=0{,}81$ кВт.

Частота $f=50$.

Число фаз $m=3$.

Линейное напряжение $U_л=380$ В.

Фазное напряжение $U=220$ В.

Синхронная скорость вращения $n_c=1000$ об/мин.

Коэффициент полезного действия $\eta=72{,}8\%$.

Коэффициент мощности $\cos\varphi=0{,}714$.

Угол односторонней конусности $\alpha=5°25'$.

2. Размеры сердечника статора (рис. 1).

Внешний диаметр $Da=0{,}160$ м.

Внутренний диаметр сердечника:

$D_{i_1}=0{,}1062$ м (максимальный);

$D_{i_2}=0{,}093$ м (минимальный);

$D_{i_{ср}}=0{,}0996$ м (средний).

Длина сердечника $l_1=0{,}07$ м.

Число пазов статора $z_1=36$.

3. Размеры паза статора (рис. 2).

$h_1=0{,}0173$ м; $d_1=0{,}0068$ м; $d_2=0{,}0048$ м; $h_{ш_1}=0{,}5\cdot10^{-3}$ м; $a_1=0{,}0025$ м.

4. Размеры сердечника ротора (см. рис. 1).

Воздушный зазор наименьший $\delta_н=0{,}25\cdot10^{-3}$ м.

Внешний диаметр:

$d_{a_1}=0{,}1057$ м (максимальный);

$d_{a_2}=0{,}0925$ м (минимальный);

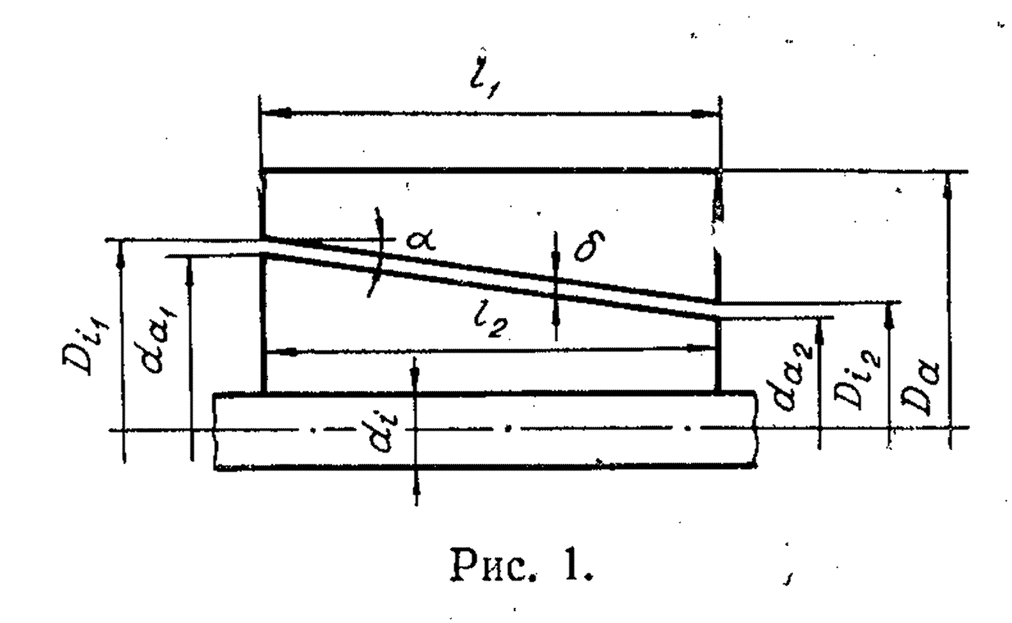


Рис. 1.

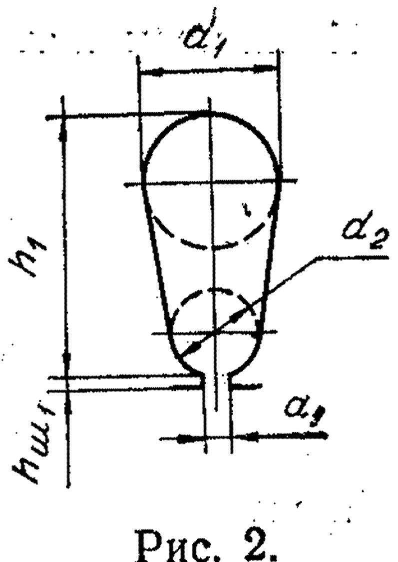


Рис. 2.

$d_{a_{ср}}=0{,}0991$ м (средний);

$d_i=0{,}03$ м (внутренний диаметр сердечника ротора).

Длина сердечника $l_2=0{,}07$ м.

Число пазов ротора $z_2=26$.

5. Размеры паза ротора (рис. 3).

$d_1=5{,}3\cdot10^{-3}$ м; $d_2=2{,}4\cdot10^{-3}$ м; $h_{ш_2}=0{,}3\cdot10^{-3}$ м; $h_2=15{,}2\cdot10^{-3}$ м.

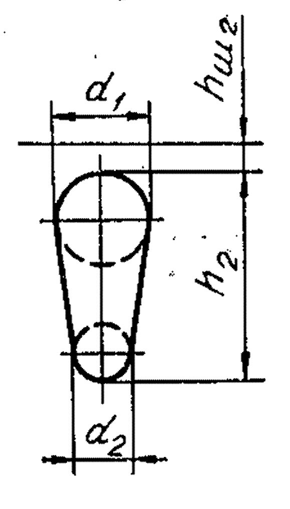


Рис. 3.

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1=\frac{z_1}{2pm}=\frac{36}{2\cdot3\cdot3}=2.$$

Полюсное деление

$$\tau=\frac{\pi D_{i_{ср}}}{2p}=\frac{3{,}14\cdot9{,}96\cdot10^{-2}}{6}=5{,}22\cdot10^{-2}\text{м}.$$

Расчетная фазовая э.д.с.

$$E=U\left(1-\frac{3\delta}{\tau q_1}\right)=220\left(1-\frac{3\cdot0{,}25\cdot10^{-3}}{5{,}22\cdot10^{-2}\cdot2}\right)=218\text{ В}.$$

Обмоточный коэффициент

$$k_0=k_у\cdot k_р,$$

где $k_у$ — коэффициент укорочения ($k_у=0{,}985$);

$k_р$ — коэффициент распределения

$$\left(k_р=\frac{\sin\left(\frac{180°}{2m}\right)}{q_1\cdot\sin\left(\frac{180°}{2q_1m}\right)}=\frac{0{,}5}{2\cdot0{,}258}=0{,}97\right).$$

$$k_0=0{,}985\cdot0{,}97=0{,}955.$$

Принимаем значение $A=230\cdot 10^2$ А/м.
Зубцовое деление

$$t_1 = \frac{\pi D_{l_{ср}}}{z_1} = \frac{3,14\cdot 0,0996}{36} = 8,7\cdot 10^{-3}\ м$$

Ток статора

$$I_{1н} = \frac{P_2}{3U\eta\cos\varphi} = \frac{810}{3\cdot 220\cdot 0,728\cdot 0,714} = 2,35А$$

Число пар параллельных ветвей $a=1$.
Число эффективных проводников на паз

$$S_п = \frac{A\cdot t_1\cdot a}{I_{1н}} = \frac{230\cdot 10^2\cdot 8,7\cdot 10^{-3}\cdot 1}{2,35} = 85$$

Число последовательных витков фазы статора

$$W = \frac{S_п\cdot p\cdot q_1}{a} = \frac{85\cdot 3\cdot 2}{1} = 510$$

Эффективное число витков одной фазы статора

$$W_э = W\cdot k_0 = 510\cdot 0,955 = 486$$

Расчетный магнитный поток

$$\Phi = \frac{E\cdot 10^{-2}}{2,22\cdot\frac{f}{50}\cdot W_э} = \frac{218\cdot 10^{-2}}{2,22\cdot 1\cdot 486} = 0,202\cdot 10^{-2}\ Вб$$

Разбиваем магнитную цепь на три участка и для каждого из них строим зависимость $\Phi=f(F_п)$. Первое значение потока каждого участка принимаем равным $\frac{1}{3}\Phi$.

Участок 2

$$D_{l_{ср}} = 0,0996\ м;\quad d_{a_{ср}} = 0,0991\ м;\ l = 23,3\cdot 10^{-3}\ м;$$

$$\Phi = 0,0673\cdot 10^{-2}\ Вб;\ \tau = \frac{\pi\cdot D_{l_{ср}}}{2p} = \frac{3,14\cdot 0,0996}{6} = 5,22\cdot 10^{-2}\ м.$$

Индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{a_\delta\cdot\tau\cdot l} = \frac{0,0673\cdot 10^{-2}}{0,636\cdot 5,22\cdot 10^{-2}\cdot 23,3\cdot 10^{-3}} = 0,8740\ Т$$

Зубцовое деление статора $t_1=8,7\cdot 10^{-3}$ м.

Зубцовое деление ротора $t_2 = \frac{\pi d_a\ \Phi}{z_2} = \frac{3,14\cdot 0,0991}{26} =$

$$=12\cdot 10^{-3}\ м;$$

$$a_1=2,5\cdot 10^{-3}\ м;\ t_{1min}=8,5\cdot 10^{-3}\ м$$

Коэффициент воздушного зазора

$$k_\delta = 1 + \frac{a_1^2 z_1}{(5\delta + a_1)\, 2\pi l \operatorname{tg}\alpha} \cdot \ln\left[1 + \frac{2\pi l \operatorname{tg}\alpha}{z_1/t_{1\min} - \dfrac{a_1^2}{5\delta + a}}\right] =$$

$$= 1 + \frac{2{,}5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 36}{(5 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3} + 2{,}5 \cdot 10^{-3}) \cdot 2\pi \cdot 23{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}0945} \times$$

$$\times \ln\left[1 + \frac{2\pi \cdot 23{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}0945}{36/8 \cdot 10^{-3} - \dfrac{2{,}5^2 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3} + 2{,}5 \cdot 10^{-3}}}\right] = 1{,}24.$$

Число ампер-витков воздушного зазора

$$AW_\delta = 0{,}8 \cdot \delta \cdot k_c\, B_\delta \cdot 10^6 = 0{,}8 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}24 \cdot 0{,}8740 \times$$

$$\times 10^6 = 216\ \text{А}.$$

Расчетная ширина зубца статора

$$b_{zp_1} = \frac{\pi\left(D_{i_{\text{ср}}} + h_1 + h_{\text{ш}_1}\right)}{z_1} - \frac{d_1 + d_2}{2} =$$

$$= \frac{3{,}14\,(0{,}0996 + 0{,}0173 + 0{,}0005)}{36} - \frac{6{,}9 + 4{,}8) \cdot 10^{-3}}{2} =$$

$$= 4{,}45 \cdot 10^{-3}\ \text{м}.$$

Индукция в зубцах статора

$$B_{z_1} = B_\delta \cdot \frac{t_1}{b_{zp_1} \cdot k_{\text{Fe}}} = \frac{0{,}8740 \cdot 8{,}7 \cdot 10^{-3}}{4{,}45 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}95} = 1{,}8000\ \text{Т}$$

Расчетная ширина зубца ротора

$$b_{zp_2} = \frac{\pi\left(d_{a_{\text{ср}}} - h_2 - h_{\text{ш}_2}\right)}{z_2} - \frac{d_1 + d_2}{2} =$$

$$= \frac{3{,}14\,(99{,}1 - 15{,}2 - 0{,}3) \cdot 10^{-3}}{26} - \frac{(5{,}3 + 2{,}4) \cdot 10^{-3}}{2} =$$

$$= 6{,}25 \cdot 10^{-3}\ \text{м}.$$

Индукция в зубцах ротора

$$B_{z_2} = B_\delta \cdot \frac{t_2}{b_{zp_2} \cdot k_{\text{Fe}}} = \frac{0{,}8740 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{6{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}95} = 1{,}7700\ \text{Т}.$$

Удельные ампер-витки

$$aW_{z_1} = 27 \cdot 10^2\ \text{А/м},\quad aW_{z_2} = 23{,}8 \cdot 10^2\ \text{А/м}.$$

Число ампер-витков зубцов статора

$$AW_{z_1} = h_{z_1} \cdot aw_{z_1} = 17{,}12 \cdot 10^{-3} \cdot 27 \cdot 10^2 = 46{,}2\ \text{А}$$

$$\left[h_{z_1} = h_1 - 0{,}1 d_1 + h_{\text{ш}_1} = (17{,}3 + 0{,}5 - 0{,}1 \cdot 6{,}8) \cdot 10^{-3} = 17{,}12 \cdot 10^{-3}\ \text{м}\right].$$

Число ампер-витков зубцов ротора

$$AW_{z_2} = h_{z_2} \cdot aw_{z_2} = 15,26 \cdot 10^{-3} \cdot 23,8 \cdot 10^2 = 36,2 \text{ А}.$$

$$\left[h_{z_2} = h_2 + h_{ш_2} = 0,1d_2 = (15,2 + 0,3 - 0,1 \cdot 24) \cdot 10^{-3} = \right.$$
$$\left. = 15,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}\right]$$

Расчетная высота спинки статора

$$h_{a_1} = \frac{D_a - D_{i_{ср}}}{2} - h_{z_1} = \frac{0,16 - 0,0996}{2} - 17,12 \cdot 10^{-3} =$$
$$= 13,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Индукция в спинке статора

$$B_{a_1} = \frac{\Phi}{2l \cdot h_{a_2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,0673 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 2,33 \cdot 13,08 \cdot 10^{-3} \cdot 0,95} = 1,1600 \text{ Т}.$$

Индукция в спинке ротора

$$B_{a_2} = \frac{\Phi}{2l \cdot h_{a_2} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,673 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2,33 \cdot 19,29, 10^{-3} \cdot 0,95} = 0,79 \text{ Т}$$

Расчетная высота спинки ротора

$$h_{a_2} = \frac{d_{a_{ср}} \cdot d_i}{2} - h_{z_2} = \left(\frac{99,1 - 30}{2} - 15,26\right) \cdot 10^{-3} = 19,29 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Удельные ампер-витки

$$aw_{a_1} = 5,47 \cdot 10^2 \text{ А/м}, \quad aw_{a_2} = 2,87 \cdot 10^2 \text{ А/м}.$$

Расчетная длина силовой линии в спинке ротора

$$L_{a_2} = \frac{\pi (d_i + h_{a_2})}{4p} = \frac{3,14 (30 + 19,29)}{4 \cdot 3} \cdot 10^{-3} = 12,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Расчетная длина силовой линии в спинке статора

$$L_{a_1} = \frac{\pi (D_a - h_{a_1})}{4p} = \frac{3,14 (160 - 13,08)}{4 . 3} \cdot 10^{-3} = 38,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Число ампер-витков спинки статора

$$AW_{a_1} = L_{a_1} . aw_{a_1} = 38,4 \cdot 10^{-3} \cdot 5,47 \cdot 10^2 = 21 \text{ А}$$

Число ампер-витков спинки ротора

$$AW_{a_2} = L_{a_2} \cdot aw_{a_2} = 12,8 \cdot 10^{-3} \cdot 2,87 \cdot 10^2 = 3,67 \text{ А}$$

Суммарное число ампер-витков

$$AW = AW_{z_1} + AW_{z_2} + AW_\delta + AW_{a_1} + AW_{a_2} = 42,2 + 36,2 + 216 +$$
$$+ 21 + 3,67 = 323,07 \text{ А}.$$

$$\Phi = 0,072 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}; \quad B_\delta = 0,9350 \text{ Т};$$

$$AW_\delta = 232\ \text{А};$$

$$B_{z_1} = 1{,}8300\ \text{Т}; \qquad B_{z_2} = 1{,}9000\ \text{Т};$$

$$aw_{z_1} = 48 \cdot 10^2\ \text{А/м}; \qquad aw_{z_2} = 41{,}6 \cdot 10^2\ \text{А/м};$$

$$AW_{z_1} = 48 \cdot 1{,}712 = 82\ \text{А}; \qquad AW_{z_2} = 41{,}6 \cdot 1{,}526 = 63{,}5\ \text{А};$$

$$B_{a_1} = 1{,}2400\ \text{Т}; \qquad B_{a_2} = 0{,}8450\ \text{Т};$$

$$aw_{a_1} = 6{,}38 \cdot 10^2\ \text{А/м}; \qquad aw_{a_2} = 3{,}13 \cdot 10^2\ \text{А/м};$$

$$AW_{a_1} = 6{,}38 \cdot 38{,}4 = 24{,}5\ \text{А}; \qquad AW_{a_2} = 12{,}8 \cdot 3{,}13 = 4\text{А};$$

$$AW = 232 + 82 + 63{,}5 + 24{,}5 + 4 = 406\ \text{А};$$

$$\Phi = 0{,}062 \cdot 10^{-2}\ \text{Вб}; \qquad B_\delta = 0{,}8050\ \text{Т}; \qquad AW_\delta = 199\ \text{А};$$

$$B_{z_1} = 1{,}6600\ \text{Т}; \qquad B_{z_2} = 1{,}6300\ \text{Т};$$

$$aw_{z_1} = 16{,}9 \cdot 10^2\ \text{А/м}; \qquad aw_{z_2} = 15{,}6 \cdot 10^2\ \text{А/м};$$

$$AW_{z_1} = 1{,}712 \cdot 16{,}9 = 29\ \text{А}; \qquad AW_{z_2} = 1{,}526 \cdot 15{,}6 = 23{,}8\ \text{А};$$

$$B_{a_1} = 1{,}0700\ \text{Т}; \qquad B_{a_2} = 0{,}7300\ \text{Т};$$

$$aw_{a_1} = 4{,}6 \cdot 10^2\ \text{А/м}; \qquad aw_{a_2} = 2{,}57 \cdot 10^2\ \text{А/м};$$

$$AW_{a_1} = 3{,}84 \cdot 4{,}6 = 17{,}7\ \text{А}; \qquad AW_{a_2} = 1{,}28 \cdot 2{,}57 = 3{,}29\ \text{А};$$

$$AW = 199 + 29 + 23{,}8 + 17{,}7 + 3{,}29 = 272{,}69\ \text{А}.$$

Участок 1

$$D_{i_{\text{ср}}} = 104 \cdot 10^{-3}\ \text{м}; \quad d_{a_{\text{ср}}} = 103{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{м}; \quad l = 23{,}3 \cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

$\Phi = 0{,}0673 \cdot 10^{-2}$ Вб;

$$\tau = 5{,}45 \cdot 10^{-3}\ \text{м}; \qquad B_\delta = 0{,}8380\ \text{Т};$$

$$t_1 = 9{,}05 \cdot 10^{-3}\ \text{м}; \qquad t_2 = 12{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

$$k_\delta = 1 + \frac{6{,}25 \cdot 10^{-6} \cdot 36}{(5 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3} + 2{,}5 \cdot 10^{-3})\, 2\pi \cdot 23{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}0945} \times$$

$$\times \ln\left[1 + \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 23{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}0945}{36/8{,}85 \cdot 10^{-3} - \dfrac{6{,}25 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3} + 2{,}5 \cdot 10^{-3}}}\right] = 1{,}227;$$

$$t_{1\min} = 8{,}85 \cdot 10^{-3}\ \text{м}; \qquad a_1 = 2{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

$$AW_\delta - 0{,}8 \cdot 0{,}25 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}22 \cdot 0{,}8380 \cdot 10^6 = 202\ \text{А};$$

$$b_{z_{p_1}} = \frac{3{,}14\,(104 + 17{,}8)}{36} - 5{,}8 \cdot 10^{-3} = 4{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

$$B_{z_1} = \frac{0{,}8370 \cdot 9{,}05 \cdot 10^{-3}}{4{,}8 \cdot 0{,}95 \cdot 10^{-3}} = 1{,}6700\ \text{Вб};$$

$$b_{z_{p_2}} = \frac{3{,}14\,(103{,}5 - 15{,}5)}{26} - 3{,}85 \cdot 10^{-3} = 6{,}75 \cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

$$B_{z_2} = \frac{0,8380 \cdot 12,5 \cdot 10^{-3}}{6,75 \cdot 0,95 \cdot 10^{-3}} = 1,6400 \text{ Т};$$

$aw_{z_1} = 17,5 \cdot 10^2$ А/м; $aw_{z_2} = 16,1 \cdot 10^2$ А/м,

$h_{z_1} = 17,12 \cdot 10^{-3}$ м; $AW_{z_1} = 17,5 \cdot 1,712 = 30$ А;

$h_{z_2} = 15,26 \cdot 10^{-3}$ м; $AW_{z_2} = 16,1 \cdot 1,526 = 24,6$ А;

$$h_{a_1} = \frac{160 - 104}{2} - 17,12 \cdot 10^{-3} = 10,88 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$B_{a_1} = \frac{0,0673 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 2,33 \cdot 10,88 \cdot 0,95 \cdot 10^{-5}} = 1,3900 \text{ Т};$$

$$h_{a_2} = \frac{103,5 - 30}{2} - 15,26 \cdot 10^{3} = 21,49 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$B_{a_2} = \frac{0,0673 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 2,33 \cdot 21,49 \cdot 0,95 \cdot 10^{-5}} = 0,7100 \text{ Т};$$

$aw_{a_1} = 8,79 \cdot 10^2$ А/м; $aw_{a_2} = 2,49 \cdot 10^2$ А/м;

$L_{a_1} = 38,4 \cdot 10^{-3}$ м; $L_{a_2} = 12,8 \cdot 10^{-3}$ м;

$AW_{a_1} = 3,84 \cdot 8\,79 = 33,7$ А; $AW_{a_2} = 1,28 \cdot 2,49 = 3,2$ А;

$AW = 202 + 30 + 24,6 + 33,7 + 3,2 = 293,5$ А.

$\Phi = 0,72 \cdot 10^{-2}$ Вб; $B_\delta = 0,8950$ Т; $AW_\delta = 216$ А;

$B_{z_1} = 1,7850$ Т; $aw_{z_1} = 25,5 \cdot 10^2$ А/м;

$B_{z_2} = 1,7550$ Т; $aw_{z_2} = 22,6 \cdot 10^2$ А/м;

$B_{a_1} = 1,4900$ Т; $aw_{a_1} = 10,9 \cdot 10^2$ А/м;

$B_{a_2} = 0,7600$ Т; $aw_{a_2} = 2,72 \cdot 10^2$ А/м

$AW_{z_1} = 1,712 \cdot 25,5 = 43,7$ А;

$AW_{z_2} = 1,526 \cdot 22,6 = 34,5$ А;

$AW_{a_1} = 3,84 \cdot 10,9 = 41,8$ А;

$AW_{a_2} = 1,28 \cdot 2,72 = 3,5$ А;

$AW = 216 + 43,7 + 34,5 + 41,8 + 3,5 = 339,5$ А.

Участок 3

$D_{i_{\text{ср}}} = 95,2 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{a_{\text{ср}}} = 94,7 \cdot 10^{-3}$ м; $l = 23,3 \cdot 10^{-3}$ м;

$\Phi = 0,10673 \cdot 10^{-3}$ Вб; $k_\delta = 1,255$;

$\tau = 4,98 \cdot 10^{-2}$ м; $B_\delta = 0,9150$ Т; $t_1 = 8,3 \cdot 10^{-3}$ м;

$$t_2 = 11{,}5.10^{-3} \text{ м};$$

$$AW_\delta = 0{,}8\cdot 0{,}25\cdot 10^{-3}\cdot 1{,}255\cdot 0{,}9150\cdot 10^6 = 230 \text{ A};$$

$$b_{z_{p_1}} = \left[\frac{3{,}14\,(95{,}2+17{,}8)}{36} - 5{,}8\right].10^{-3} = 4{,}06\cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$B_{z_1} = \frac{0{,}9150\cdot 8{,}3\cdot 10^{-3}}{4{,}06\cdot 0{,}95\cdot 10^{-3}} = 1{,}9700 \text{ T};$$

$$b_{z_{p_2}} = \left[\frac{3{,}14\,(94{,}7-15{,}5)}{26} - 3{,}85\right]\cdot 10^{-3} = 5{,}71\cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$B_{z_2} = \frac{0{,}9150\cdot 11{,}5\cdot 10^{-3}}{5{,}71\cdot 0{,}95\cdot 10^{-3}} = 1{,}9400 \text{ T};$$

$$aw_{z_1} = 57{,}9.10^2 \text{ A/м}; \qquad aw_{z_2} = 50{,}3\cdot 10^2 \text{ A/м};$$

$$h_{z_1} = 1{,}712\cdot 10^{-2} \text{ м}; \qquad h_{z_2} = 1{,}526\cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$AW_{z_1} = 1{,}712\cdot 57{,}9 = 99 \text{ A}; \qquad AW_{z_2} = 1{,}526\cdot 50{,}3 = 77 \text{ A};$$

$$h_{a_1} = \left(\frac{160-95{,}2}{2} - 17{,}12\right)\cdot 10^{-3} = 15{,}28\cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$B_{a_1} = \frac{0{,}0673\cdot 10^{-2}}{2\cdot 2{,}33\cdot 15{,}28\cdot 0{,}95\cdot 10^{-5}} = 10{,}000 \text{ T};$$

$$h_{a_2} = \left(\frac{94{,}7-30}{2} - 15{,}26\right)\cdot 10^{-3} = 17{,}09.10^{-3} \text{ м};$$

$$B_{a_2} = \frac{0{,}0673\cdot 10^{-2}}{2\cdot 2{,}33\cdot 17{,}09\cdot 0{,}95\cdot 10^{-5}} = 0{,}8900 \text{ T};$$

$$aw_{a_1} = 4{,}03\cdot 10^2 \text{ A/м}; \qquad aw_{a_2} = 3{,}37\cdot 10^2 \text{ A/м};$$

$$L_{a_1} = 3{,}84\cdot 10^{-2} \text{ м}; \qquad L_{a_2} = 1{,}28\cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$$AW_{a_1} = 4{,}03\cdot 3{,}84 = 15{,}5 \text{ A}; \qquad AW_{a_2} = 3{,}37\cdot 1{,}28 = 4{,}3 \text{ A};$$

$$AW = 230+99+77+15{,}5+4{,}3 = 425{,}8 \text{ A};$$

$$\Phi = 0{,}062\cdot 10^{-2} \text{ Вб}; \qquad B_\delta = 0{,}8440 \text{ T}; \qquad AW_\delta = 212 \text{ A};$$

$$B_{z_1} = 1{,}8150 \text{ T}; \qquad aw_{z_1} = 28{,}6\cdot 10^2 \text{ A/м};$$

$$B_{z_2} = 1{,}7900 \text{ T}; \qquad aw_{z_2} = 26\cdot 10^2 \text{ A/м};$$

$$B_{a_1} = 0{,}9200 \text{ T}; \qquad aw_{a_1} = 3{,}53\cdot 10^2 \text{ A/м};$$

$$B_{a_2} = 0{,}8200 \text{ T}; \qquad aw_{a_2} = 3{,}02\cdot 10^2 \text{ A/м};$$

$$AW_{z_1} = 28{,}6\cdot 1{,}712 = 48 \text{ A};$$

$$AW_{z_2} = 1{,}526\cdot 26 = 39{,}7 \text{ A};$$

$$AW_{a_1} = 3{,}53\cdot 3{,}84 = 13{,}5 \text{ A};$$

$$AW_{a_2} = 3{,}02\cdot 1{,}28 = 3{,}87 \text{ A};$$

$$AW = 221 + 48 + 39{,}7 + 13{,}5 + 3{,}87 = 317{,}07 \text{ А}.$$

Строим зависимости $\Phi_i = f(AW)$ и по суммарной характеристике определяем Φ_1; Φ_2; Φ_3 и общее число AW (рис. 4).

$AW = 326{,}2$ А; $\Phi_1 = 0{,}071 \cdot 10^{-2}$ Вб; $\Phi_2 = 0{,}068 \cdot 10^{-2}$ Вб; $\Phi_3 = 0{,}064 \cdot 10^{-2}$ Вб.

По найденным ампер-виткам определяем намагничивающий ток

$$I_\mu = \frac{2{,}22}{m} \cdot \frac{AW \cdot p}{W_э} = \frac{2{,}22}{3} \cdot \frac{326{,}2 \cdot 3}{486} = 1{,}49 \text{ А}.$$

Реактивное сопротивление взаимной индуктивности

$$X_\mu = \frac{E}{I_\mu} = \frac{218}{1{,}49} = 146 \text{ Ом}.$$

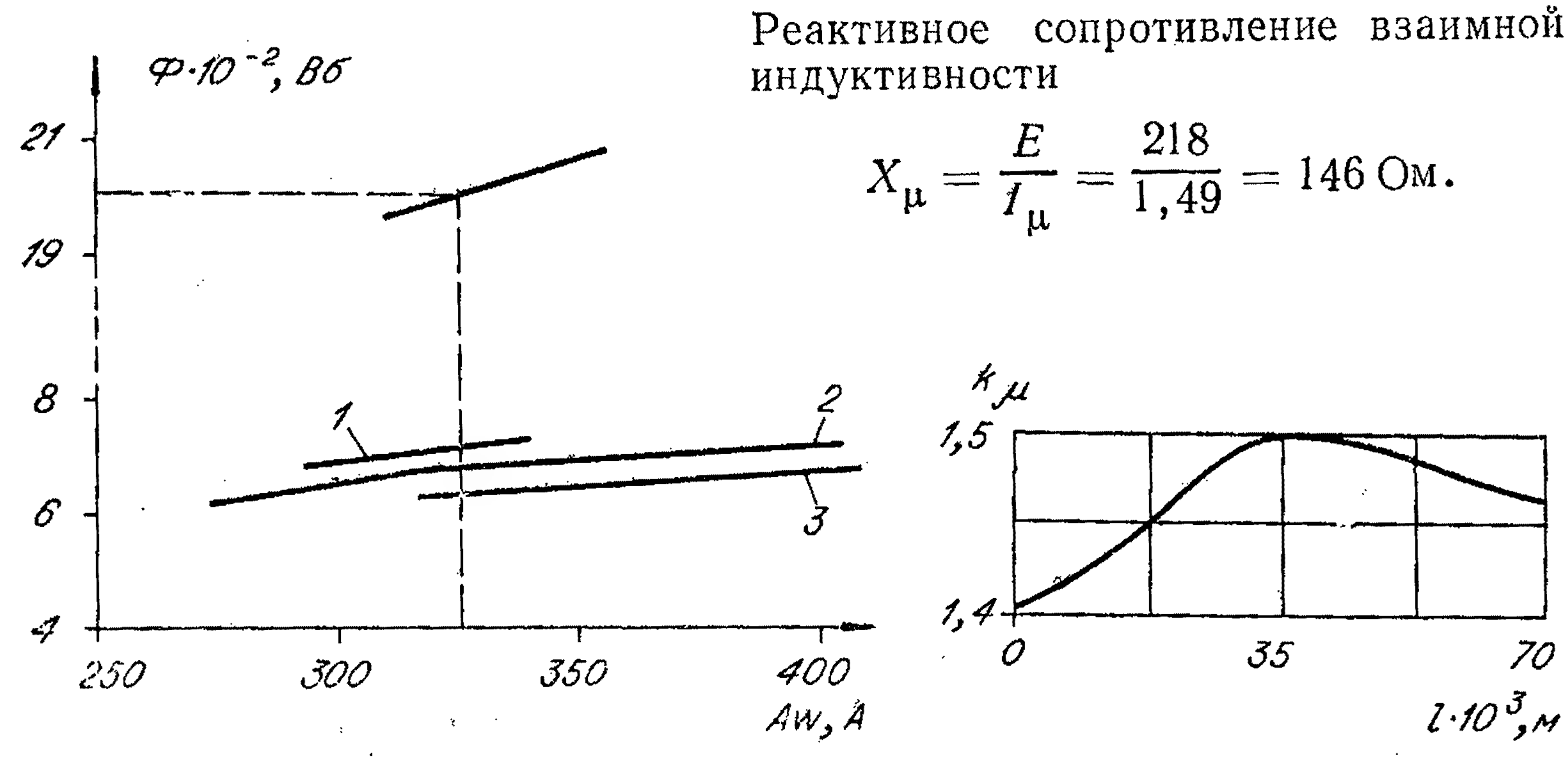


Рис. 4.

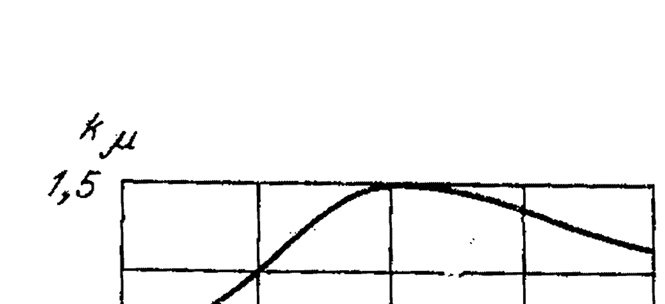


Рис. 5.

Коэффициент насыщения каждого участка

$$k_{\mu_1} = \frac{AW}{AW_{\delta_1}} = \frac{326{,}2}{229} = 1{,}43;$$

$$k_{\mu_2} = \frac{AW}{AW_{\delta_2}} = \frac{326{,}2}{218} = 1{,}5;$$

$$k_{\mu_3} = \frac{AW}{AW_{\delta_3}} = \frac{326{,}2}{220} = 1{,}48.$$

Значения AW_i рассчитываются по найденным Φ_i.

Строим кривую $k_\mu = f(l)$ (рис. 5).

После графического интегрирования имеем $k_\mu = 1{,}455$.

Коэффициент насыщения зубцов каждого участка

$$k_{z_1} = \frac{AW_\delta + AW_{z_1} + AW_{z_2}}{AW_\delta};$$

$$k_{z_1} = \frac{229 + 71{,}4 + 53{,}5}{229} = 1{,}54;$$

$$k_{z_2} = \frac{218 + 50 + 39{,}6}{218} = 1{,}41;$$

$$k_{z_3} = \frac{220 + 39{,}3 + 32}{220} = 1{,}32.$$

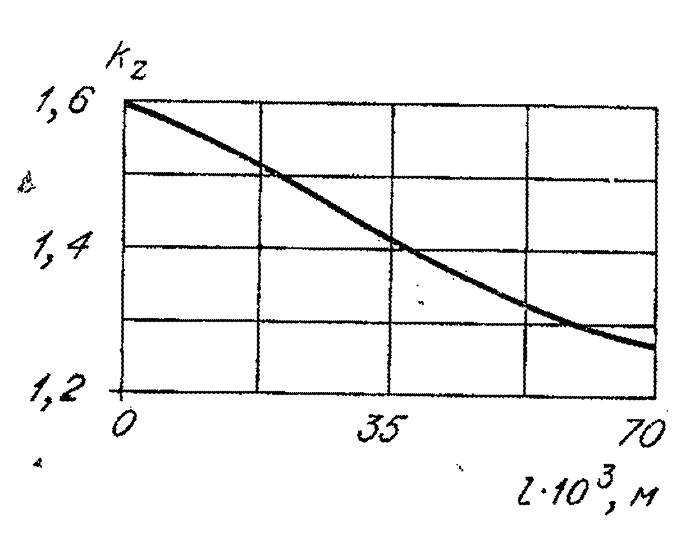


Рис. 6.

Рис. 7.

Строим зависимость $k_z = f(l)$ (рис. 6).

После графического интегрирования имеем $k_z = 1{,}44$.

Строим зависимость $a_\delta = f(l)$ (рис. 7).

После графического интегрирования имеем $a_\delta = 0{,}685$.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = \frac{1}{\cos\alpha}\,\rho\,\frac{l}{aq_{\text{Cu}}}\,\frac{W}{100}\,k_R = \frac{1}{0{,}995}\cdot 0{,}000218\cdot\frac{0{,}348\cdot 510}{1\cdot 0{,}000374\cdot 100}\cdot 1 = 10{,}35\ \text{Ом}$$

($l = 0{,}348$; коэффициент вытеснения тока $k_R = 1$).

Проводимость рассеяния статора

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{п}_1} + \lambda_{z_1} + \lambda_{s_1}.$$

Проводимость рассеяния паза

$$\lambda_{\text{п}_1} = 0{,}4\pi\left[\frac{h_1}{3d}\,k_\beta + \left(0{,}785 + \frac{d}{2d} + \frac{h_z}{d} + \frac{h_{m_1}}{b_{m_1}}\right)k_\beta\right]$$

$$\left(k_{\beta_1} = \frac{1+3\beta}{4} = \frac{1+3\cdot 0{,}89}{4} = 0{,}94;\right.$$

$$\left. k_\beta = \frac{1}{4} + \frac{3}{4}\,k_{\beta_1} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4}\cdot 0{,}94 = 0{,}955;\quad \beta = 0{,}89\right).$$

$$\lambda_{\text{п}_1} = 0{,}4\cdot 3{,}14\left[\frac{0{,}0178}{3\cdot 0{,}0048}\cdot 0{,}955 + \left(0{,}785 + \frac{0{,}0025}{2\cdot 0{,}0048} + \frac{0{,}0005}{0{,}0025}\right)0{,}94\right] = 2{,}64.$$

Проводимость рассеяния высших гармонических составляющих

$$\lambda_{z_1} = \frac{t_1}{9{,}5\delta k_\delta} = \frac{0{,}087}{9{,}5\cdot 0{,}0025\cdot 1{,}28} = 2{,}94.$$

Проводимость рассеяния лобовых частей

$$\lambda_{s_1} = 0{,}42 \frac{q}{l_l} (l_s - 0{,}64\beta\tau) \cdot \frac{1}{\cos\alpha} = 0{,}42 \frac{2}{0{,}07} \times$$

$$\times (0{,}0935 - 0{,}64 \cdot 0{,}80 \cdot 0{,}0522) \frac{1}{0{,}995} = 0{,}782,$$

где $l_s = k_1\tau + L = 1{,}4 \cdot 0{,}0525 + 0{,}02 = 0{,}0935$ м;
$k_1 = 1{,}4$; $L = 0{,}02$;

$$\tau_y = 3{,}14 \left(\frac{0{,}0996 + 0{,}0178}{6}\right) 0{,}85 = 0{,}0525 \text{ м}.$$

Отсюда

$$\lambda_1 = 2{,}64 + 2{,}94 + 0{,}782 = 6{,}36.$$

Реактивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_1 = \frac{4\pi f l_t W^2}{pq \cos\alpha} \lambda_1 \cdot 10^{-3} = \frac{4 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 7 \cdot 510^2}{3 \cdot 2 \cdot 0{,}995} \times$$

$$\times 6{,}36 \cdot 10^{-3} = 12{,}1 \text{ Ом}.$$

Коэффициент рассеяния статора

$$\tau_1 = \frac{X_1}{X_\mu} = \frac{12{,}1}{146} = 0{,}083.$$

Коэффициент сопротивления статора

$$\rho_1 = \frac{r_1}{X_1 + X_\mu} = \frac{10{,}36}{12{,}7 + 146} = 0{,}065.$$

ПАРАМЕТРЫ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА

Активное сопротивление колец

$$r_\text{к} = \frac{\rho D_\text{к}}{100 p \gamma q_\text{к}} = \frac{8{,}44 \cdot 26}{3 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 3 \cdot 112} \cdot \frac{0{,}0445}{100} = 0{,}0000154 \text{ Ом},$$

$$\text{где} \quad \gamma = \frac{2\pi p}{z_2}.$$

Активное сопротивление стержня

$$r_\text{c} = \rho \frac{l_\text{c} \cdot 1}{q_\text{c} 100 \cos\alpha} k_R = \frac{10^{-2} \cdot 0{,}07 \cdot 1}{22{,}5 \cdot 0{,}995 \cdot 0{,}005022 \cdot 100} = 0{,}00007 \text{ Ом},$$

$$\text{где } q_\text{c} = \frac{\pi r_2^2}{2} + \frac{\pi r_1^2}{2} + \frac{d_1 + d_2}{2} (h_2 - r_1 - r_2) = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}012^2}{2} +$$

$$+ \frac{3{,}14 \cdot 0{,}0265^2}{2} + \frac{0{,}077}{2} (0{,}152 - 0{,}012 - 0{,}0265) = 0{,}005022 \text{ м}.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к статору,

$$r_2' = (r_с + r_к)\frac{4mW_э^2}{z_2 f_{ск}^2} = (0,00007 + 0,0000154) \times$$

$$\times \frac{4 \cdot 3 \cdot 486^2}{26 \cdot 0,995^2} = 9,4 \text{ Ом}.$$

Проводимость рассеяния ротора

$$\lambda_2 = \lambda_{п_2} + \lambda_{z_2} + \lambda_{ск}.$$

Проводимость рассеяния паза ротора

$$\lambda_{п_2} = 0,4\pi \left\{\left[\frac{h_1}{3d}\left(1 - \frac{\pi d^2}{8q_с}\right) + 0,66 - \frac{b_{m_2}}{2d}\right]k_\lambda + 0,3 + 1,12\frac{10^3 h_m}{I_2}\right\} =$$

$$= 0,4 \cdot 3,14 \left\{\left[\frac{0,01135}{3 \cdot 0,0053}\left(1 - \frac{3,14 \cdot 0,0053^2}{8 \cdot 0,005022}\right) + 0,66 - 0\right]1 + \right.$$

$$\left. + 0,3 + 1,12\frac{10^3 \cdot 0,03}{136}\right\} = 2,26$$

где $I_2 = \frac{2W_э}{z_2} \cdot \frac{P}{U} = \frac{2 \cdot 486}{26} \cdot \frac{810}{220} = 136$ А.

Проводимость рассеяния высших гармонических составляющих

$$\lambda_{z_2} = \frac{t_2}{9,5\delta \cdot k_\delta} = \frac{0,12}{9,5 \cdot 0,0025 \cdot 1,28} = 4,06.$$

Проводимость рассеяния скоса пазов

$$\lambda_{ск} = \frac{t_2}{9,5\delta k_\delta} \cdot \frac{S_{ск}^2}{k_\mu} = \frac{0,12}{9,5 \cdot 0,0025 \cdot 1,28} \cdot \frac{1,29}{1,455} = 3,8.$$

Отсюда

$$\lambda_2 = 2,26 + 4,06 + 3,8 = 10,12.$$

Реактивное сопротивление фазы обмотки ротора, приведенное к статору,

$$X_2' = X_1 \frac{\lambda_2'}{\lambda_2}$$

Приведенная проводимость рассеяния ротора

$$\lambda_2' = \lambda_2 \frac{l_2 z_1}{l_1 z_2}\left(\frac{f_W}{f_{ск}}\right)^2 = 10,12\frac{0,07 \cdot 36}{0,07 \cdot 26}\left(\frac{0,955}{0,955}\right)^2 = 12,9.$$

$$X_2' = 12,1 \cdot \frac{12,9}{10,12} = 15,4 \text{ Ом}.$$

1. Потери в меди (коэффициентом сопротивления пренебрегаем)

$$P_{\text{м}_0} = mI_\mu^2 r_1 = 3 \cdot 1{,}49^2 \cdot 10{,}35 = 69 \text{ Вт}.$$

2. Потери в стали.

Участок. 1. Потери в спинке статора

$$P_{a_1} = 1{,}6 P_{1_0} B_{a_1}^2 Q_{a_1} \sqrt{\left(\frac{f}{50}\right)^3} = 1{,}6 \cdot 0{,}33 \cdot 1{,}4700^2 \cdot 8{,}7 \cdot 1 = 9{,}9 \text{ Вт}.$$

Вес спинки статора

$$Q_{a_1} = \pi (D_a - h_{a_1}) h_{a_1} l k_{\text{Fe}} \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 \cdot 9{,}8 = 3{,}14 (16 - 1{,}088) \times$$
$$\times 1{,}088 \cdot 2{,}33 \cdot 0{,}95 \cdot 10^{-6} \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 \cdot 9{,}8 = 8{,}7 \text{ Н} \quad (k_{\text{Fe}} = 0{,}95).$$

Потери в зубцах статора

$$P_{z_1} = 1{,}8 p_{1_0} B_{z_1}^2 Q_{z_1} \sqrt{\left(\frac{f}{50}\right)^3} k_{\text{т}} = 1{,}8 \cdot 0{,}33 \cdot 1{,}7600^2 \cdot 5 \cdot 1 \times$$
$$\times 1{,}5 = 13{,}8 \text{ Вт}.$$

($k_{\text{т}}$ — коэффициент обработки, равный 1,5; вес зубцов статора

$$Q_{z_1} = z_1 b_{z_{p_1}} h_{z_1} l k_{\text{Fe}} \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 \cdot 9{,}8 = 36 \cdot 0{,}48 \cdot 1{,}71 \cdot 2{,}33 \times$$
$$\times 0{,}95 \cdot 10^{-6} \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 \cdot 9{,}8 = 5 \text{ Н}).$$

Потерями в стали ротора пренебрегаем.

Потери в активной стали

$$P_{\text{Fe}} = P_a + P_{z_1} \left[1 + 2\sqrt{t_1 (k_\delta - 1)^3}\right] = 9{,}9 + 13{,}8 \times$$
$$\times \left[1 + 2\sqrt{0{,}905 (1{,}28 - 1)^3}\right] = 27{,}9 \text{ Вт}.$$

Участок 2.

$$P_{a_1} = 1{,}6 \cdot 0{,}33 \cdot 1{,}1700^2 \cdot 10{,}1 \cdot 1 = 7{,}3 \text{ Вт};$$

$$Q_{a_1} = 3{,}14 (16 - 1{,}308 \cdot 2{,}33 \cdot 0{,}95 \cdot 10^{-6} \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 \times$$
$$\times 9{,}8 = 10{,}1 \text{ Н};$$

$$P_{z_1} = 1{,}8 \cdot 0{,}33 \cdot 1{,}8200^2 \cdot 4{,}64 \cdot 1 \cdot 1{,}5 = 13{,}7 \text{ Вт};$$

$$Q_{z_1} = 36 \cdot 0{,}445 \cdot 1{,}71 \cdot 2{,}33 \cdot 0{,}95 \cdot 10^{-6} \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 \cdot 9{,}8 = 4{,}64 \text{ Н}$$

$$P_{\text{Fe}} = 7{,}3 + 13{,}7 \left[1 + 2\sqrt{0{,}87 (1{,}24 - 1)^3}\right] = 25{,}2 \text{ Вт}.$$

Участок 3.

$$P_{a_1} = 1{,}6 \cdot 0{,}33 \cdot 0{,}9550^2 \cdot 11{,}7 \cdot 1 = 5{,}65 \text{ Вт};$$

$$Q_{a_1} = 3{,}14 (16 - 1{,}528) 1{,}528 \cdot 2{,}33 \cdot 0{,}95 \cdot 10^{-6} \cdot 7{,}8 \cdot 10^2 \times$$
$$\times 9{,}8 = 11{,}7 \text{ Н};$$

$$P_{z_1} = 1,8 \cdot 0,33 \cdot 1,8800^2 \cdot 4,22 \cdot 11,5 = 13,3\,\text{Вт};$$

$$Q_{z_1} = 36 \cdot 0,406 \cdot 1,71 \cdot 2,33 \cdot 0,95 \cdot 10^{-6} \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 9,8 = 4,22\,\text{Н};$$

$$F_{\text{Fe}} = 5,65 + 13,3\,[1 + 2\sqrt{0,83 \cdot (1,25 - 1)^3}\,] = 22,95\,\text{Вт}.$$

Строим зависимость $P_{\text{Fe}} = f(l)$ (рис. 8).

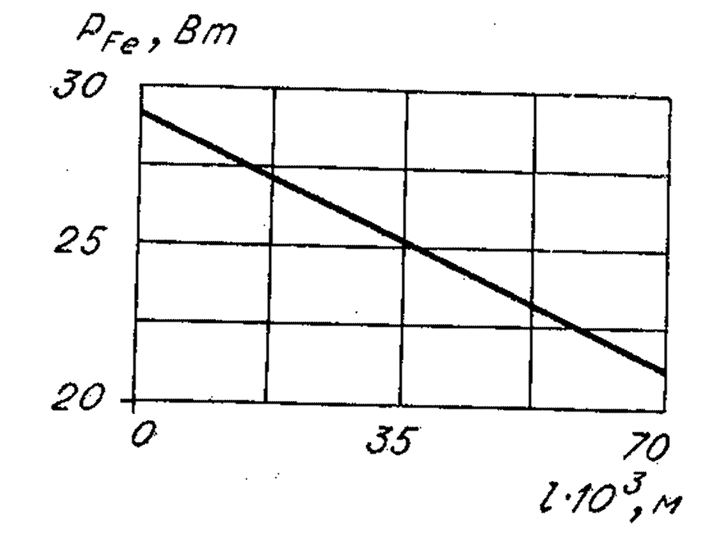


Рис. 8.

После графического интегрирования $P_{\text{Fe}} = 78$ Вт.

Механические потери

$$P_{\text{т}} = k\left(\frac{h}{1000}\right)^2\left(\frac{D_2}{100}\right)^4 =$$

$$= 6\left(\frac{937}{1000}\right)^2\left(\frac{99,6}{100}\right)^4 = 5,1\,\text{Вт}$$

(k для двигателей без обдува при $2p > 3$ равно 6).

Добавочные потери

$$P_{\text{доб}} = 0,5\,\% \cdot P = 810\,\frac{0,5}{100} = 4\,\text{Вт}.$$

Полные потери холостого хода

$$\Sigma P = P_{\text{м}_0} + P_{\text{Fe}} + P_{\text{доб}} + P_{\text{т}} = 69 + 78 + 4 + 5,1 = 156,1\,\text{Вт}$$

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{OA} = \frac{P_{\text{м}_0} + P_{\text{т}} + P_{\text{Fe}}}{mU} = \frac{69 + 78 + 5,1}{3 \cdot 220} = 0,23\,\text{А}.$$

Ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{OA}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,23^2 - 1,49^2} = 1,5\,\text{А}.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_0 = \frac{I_{OA}}{I_{\mu}} = \frac{0,23}{1,49} = 0,154.$$

Потери в меди при нагрузке

в статоре $P_{\text{м}_1} = mI_1^2\ r_1 = 3 \cdot 2,35^2 \cdot 10,35 = 172$ Rc,

в роторе $P_{\text{э}_2}\ z_2 I_2^2\ r_2 = 26 \cdot 136^2 \cdot 0,85 \cdot 10^{-4} = 41$ Вт.

Потребляемая мощность $P_1 = P + \Sigma P$.

($\Sigma P = 172 + 41 + 78 + 5 + 4,1 = 302,1$ Вт).

$P_1 = 810 + 302,1 = 1112,1$ Вт.

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1}\right) \cdot 100\,\%;$$

$$\eta = \left(1 - \frac{302,1}{1112,1}\right) \cdot 100\,\% = 72,8\,\%$$

ЛИТЕРАТУРА

1. **Александров М. П.** Тормозное устройство в машиностроении. М.— Л., «Машиностроение, 1965.
2. **Алексеев А. Е.** Конструкции электрических машин. М.— Л., Госэнергоиздат, 1958.
3. **Бородин В. Д.** Самотормозящиеся электродвигатели с конусным ротором конструкции СКБЭ Томского Совнархоза.— «Электротехническая промышленность», 1962, № 1.
4. **Веселовский О. Н., Ярунов А. М., Швец С. А., Стернина С. Л.** Некоторые вопросы исследования асинхронного конусного двигателя в режиме работы механизма ударно-вращательного действия.— «Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых», 1968, № 3.
5. **Гусельников Э. М., Цукерман Б. С.** Самотормозящиеся электродвигатели. М., «Энергия», 1971.
6. **Казанский В. М.** Беспазовый статор электрической машины. Авт. св. № 278836, кл. 21d'.— «Бюлл.», 1970, № 26.
7. **Казанский В. М.** Беспазовые электродвигатели малой мощности. Автореф. докт. дисс. М., 1971.
8. **Ковач К. П., Рац И.** Переходные процессы в машинах переменного тока. М.— Л., Госэнергоиздат, 1963.
9. **Ломинадзе В. Г., Чхиквадзе Ю. И.** Особенности расчета трехфазных тормозных асинхронных электродвигателей с конусным ротором.— «Электричество», 1962, № 3.
10. **Ломинадзе В. Г.** Графоаналитический метод расчета магнитной цепи асинхронных двигателей с конусным ротором.— «Тр. Грузинского политехнического ин-та им. В. И. Ленина», 1964, № 4.
11. **Молчанов Ю. М.** Электродвигатели со встроенным электромагнитным тормозом. М., Изд. «Информэлектро», 1969.
12. **Непаридзе Г. Д.** Электродвигатели с конусным ротором.— «Вестник электропромышленности», 1961, № 8.
13. **Петров Г. Н.** Электрические машины. Ч. II. М., Госэнергоиздат, 1963.
14. **Ряшенцев Н. П., Тимошенко Е. М.** О расчете тягового усилия электромагнита.— «Изв. Томского политехнического ин-та», 1965, т. 129 (Изд. ТГУ).
15. **Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А.** Проектирование электрических машин. М., «Энергия», 1969.
16. **Сыромятников Н. А.** Режимы работ асинхронных и синхронных двигателей. М., Госэнергоиздат, 1963.
17. **Цинцадзе Г. Ш.** Некоторые вопросы расчета механической части тормозных двигателей с коническим ротором.— «Бюлл. науч.-техн. информации ГНТК при Совете Министров СССР», 1962, № 9.

18. **Чхиквадзе Ю. И., Ломинадзе В. Г., Кривоносова В. И.** Самотормозящиеся электродвигатели с конусным ротором конструкции НИЭТИ Грузинского Совнархоза.— «Электротехническая промышленность», 1962, № 1.
19. **Швец С. А.** К расчету электромагнитной силы асинхронного двигателя с конусным ротором.— В кн.: Труды межвузовской конференции по электрическим машинам ударного действия. Новосибирск, 1967.
20. **Шуйский В. П.** Расчет электрических машин. Л., «Энергия», 1968.
21. **Райчев Вл.** Определение на аксиалиата сила в двигатели с конич. ротор.— «Електропром. и приборостроение», 1966, № 6.
22. **Рачев Д.** Влияние пространственных высших гармонических магнитного поля в воздушном зазоре асинхронных двигателей с конусным ротором на величину осевого усилия.— «Электропром. и приборостроение», 1968, № 3,08.
23. **Вада Йхахико, Мицудзина Тацуми.** «Мицабан дэкичико». ("Mitsubishi denkigiho"), 1964, № 38, № 6.
24. **Hass K.** Пат. ФРГ, кл. 21d′, 42, № 38, № 6.
25. **Pflager G. T.** Пат. США, кл. 310-262, № 2991380.
26. **Pöllot O. E.** Berechnung von Verschiebeankermotoren. (Diss.) — "Zeitschrift für Elektrotechnik", 1949.
27. "Demag" Bremsmotoren für die moderne Antriebstechnik, Duisburg, 1968.
28. Moteurs-freins C. B.— "Elektricien", m. 93. Paris, 1965.
29. Stopmotoren für Kleinheberzuge und Transportanlagen. Was ist der stopmotor? (Reklamterprospekt der firma Brown Broveri Cie). Baden (Schweiz), 1964.
30. Three-phase stopmotors CTA. (Fabbrica Italiana Motori Elettrici Torino). 1961.
31. Motores-Freno Lancor-Himmel "Elorriage.— "Industrie Electrika", S. A., 1961.
32. Пат. Франции, кл. Н02 к, № 1260639.
33. **Eichberger L.** Пат. Австрии, кл. 21d, № 234831.
34. **Schmitz L., Schmidt L., Hahn E.** Пат. ФРГ, кл. 21d′, 42, № 1145714.
35. Пат. Венгрии, кл. 21 d, № 147672.
36. **Schmitz L., Schmidt L., Hahn E.** Пат. ФРГ, кл. 21d′, 42, № 1083415.
37. **Pleuger F. W., Schneier J.** Пат. ФРГ, кл. 21d′, 46, № 1105976.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
10	11 снизу	[32]	[24]
11	16 снизу	[33]	[32]
12	1 сверху	окльцо	кольцо
12	8 сверху	[35]	[33]
15	7 сверху	Неостаток	Недостаток
15	17 снизу	[6, 77]	[6, 7]
17	3 сверху	[36]	[35]
17	3 снизу	[37]	[36]
18	5 сверху	[38]	[37]
23	3 сверху		
23	Подрис. подпись	*Рис. 19.*	*Рис. 20.*
23	»	*Рис. 20.*	*Рис. 19.*
33	12 сверху	$u = i_r r_2 \ldots$	$u_r = i_r r_2 \ldots$
33	13 сверху	$\ldots (M_т - M_с);$	$\ldots (M_т + M_с);$
33	13 снизу	u_r —	$\boldsymbol{u_r}$ —
33	14 снизу	u_s —	$\boldsymbol{u_s}$ —
34	13—14 сверху	не зависят	не зависит
36	10, 11 сверху; 1, 6, 7 снизу	cs_0	cx_0
57	4 сверху	$\ldots 36/8 \cdot 10^{-3} \ldots$	$\ldots 36/8,5 \cdot 10^{-3} \ldots$
	10 сверху	$\ldots 6,9+4,8) \ldots$	$\ldots (6,8+4,8) \ldots$
58	11 сверху	$\ldots 19,29,10^{-3} \ldots$	$\ldots 19,29 \cdot 10^{-3} \ldots$
58	3 снизу	$\ldots 42,2+36,2 \ldots$	$\ldots 46,2+36,2 \ldots$
59	2 снизу	$\ldots 0,8370 \cdot 9,05 \ldots$	$\ldots 0,8380 \cdot 9,05 \ldots$
60	11 сверху	$\ldots = 3.84 \cdot 879 = \ldots$	$\ldots = 3,84 \cdot 8,79 = \ldots$
60	2 снизу	$\Phi = 0,10673 \cdot 10^{-3}$ Вб;	$\Phi = 0,0673 \cdot 10^{-3}$ Вб;
64	3 сверху	$\ldots -0,64 \cdot 0,80 \cdot 0,0522) \ldots$	$\ldots -0,64 \cdot 0,89 \cdot 0,0522) \ldots$
64	4 сверху	где $l_s = k_1 \tau + L = \ldots$	где $l_s = k_1 \tau_y + L = \ldots$
64	9 снизу	$\cdot = \frac{10,36}{12,7+146} = \ldots$	$\cdot = \frac{10,35}{12,7+146} = \ldots$
65	2 снизу	$\ldots \left(\frac{0,955}{0,955}\right)^2 = \ldots$	$\ldots \left(\frac{0,955}{0,995}\right)^2 = \ldots$
66	9 снизу	$\ldots = 3,14(16-1,308 \cdot 2,33 \ldots$	$\ldots = 3,14(16-1,308) \cdot 1,308 \cdot 2,33 \ldots$
67	7 снизу	$P_{э_2} z_2 = I_2^2 r_2 = \cdots$	$P_{э_2} = z_2 I_2^2 r_2 = \cdots$
67	8 снизу	$P_{м_1} = \ldots = 172$ Rc,	$P_{м_1} = \ldots = 172$ Вт,
69	16 сверху	«Мицабан дэкичико».	«Мицабан дэнкичико».
69	1 снизу	Schneier J.	Schneider J.
72	4 сверху	1. А. Н. Паченков	1. А. Н. Панченков

Николай Павлович Ряшенцев
Сергей Александрович Швец

САМОТОРМОЗЯЩИЙСЯ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОНУСНЫМ РОТОРОМ

Редактор *Е. С. Иванова*
Художественный редактор *Э. С. Филонычева*
Художник *Е. Ф. Новиков*
Технический редактор *Т. П. Танакова*
Корректоры *И. С. Цитович, В. В. Бухалова*

Сдано в набор 29 августа 1973 г. Подписано в печать 28 декабря 1973 г. МН 17575. Бумага № 1 84×108$^{1}/_{32}$. 2,25 печ. л., 3,8 усл.-печ. л., 4 уч.-изд. л. Тираж 1000 экз. Заказ № 158. Цена 40 коп.

Издательство «Наука», Сибирское отделение. 630099, Новосибирск, 99, Советская, 18.

4-я типография издательства «Наука». 630077, Новосибирск, 77, Станиславского, 25.

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ИЗДАТЕЛЬСТВА «НАУКА»

готовит к выпуску следующие книги:

1. А. Н. Паченков. Теория потенциала ускорений.
2. Физико-технические проблемы строительства на Севере.
3. Повышение эффективности горной промышленности Якутии.
4. Н. А. Чинакал, П. М. Момот. Щитовая система разработки рудных месторождений.
5. Н. П. Ряшенцев, Ю. З. Ковалев. Динамика электромагнитных импульсных систем.
6. Н. Г. Дубынин. Совершенствование технологии выемки тонких наклонных жил.
7. Скважинные заряды с воздушными промежутками.

Книги высылаются наложенным платежом. Заказы направлять по адресу: 630076, Новосибирск-76. Красный проспект, 51. Магазин «Академкнига».